REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
Université M'HAMED BOUGARA BOUMERDES

Faculté de TECHNOLOGIE
Département Génie Mécanique

Mémoire de Master

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER** en **:**

Filière : Génie mécanique
Spécialité : Installations énergétiques et turbomachines

THEME

Etude numérique de l'ajout d'hydrogène dans un bruleur a swirl

Présenté par :
Bencheikh Abderrahim

Promoteur: Mr. S. Ouali

Remerciement

Je remercie dieu le tout puissant de m'avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire

Nous remercions mes chers parents qui m'ont toujours soutenu dans mes études

Tout d'abord je tiens à remercier mon promoteur Monsieur Ouali Sofiane pour son encadrement et ses conseils précieux
Mes vifs remerciements s'adressent également à mes enseignants du département Génie Mécanique de la Faculté de Technologie pour tous les efforts fournis tout au long de mon cursus universitaire

Mes sincères remerciements s'adressent également à tous les membres du jury qui me font le grand honneur d'évaluer ce travail

Enfin sans oublier bien sûr de remercier profondément tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de mon travail

Dédicace

Je dédié ce projet à :
Ma chère mère
Quoi que je dise je ne saurai jamais te remercier comme il se doit, Ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés sa toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles, mes mots ne vont jamais exprimer mon amour envers toi ma mère, que dieu te donne la santé, le bonheur et une longue vie inchALLAH
Mon cher père :
Qui n'a jamais cessé de me soutenir et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs, lui qui a toujours été là pour moi, que dieu te garde pour nous

A mes frères Mohamed et Abderrahmane et tous les membres de ma famille et mes amis surtout Zakaria Youcef Hocine Sid Ahmed Riad et a toute la famille cheradi et tous ceux qui m'ont soutenu pour attendre mon objectif

RESUME :

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre de recherches portées sur la simulation numérique de l'ajoute d'hydrogène dans le mélange air/méthane dans un bruleur stabilisé par swirl LSB (Low Swirl Burner). Le bec du bruleur a un rayon de 25 mm et se compose de deux parties distinctes ; la plaque perforée axiale d'un rayon de 15 mm où l'écoulement du pré-mélange réactif est purement axiale et de l'espace annulaire swirlé (10 mm) où l'écoulement du mélange réactif est swirlé.

L'étude s'est portée essentiellement sur l'effet de l'ajoute d'hydrogène au méthane (CH4) la richesse est constante Φ= 0.6 on a varié le pourcentage d'hydrogène de 1% jusqu' à 10% avec un pas de 1%. Le nombre de swirl est constante S est 0.5.

La simulation numérique a été effectuée en 2D ou l'effet de l'ajoute d'hydrogène a été étudié Plusieurs paramètres considérés comme étant régisseurs des structures de flammes sont analysés et comparés aux résultats expérimentaux disponibles dans la littérature, à savoir ; les champs de vitesse, température, la distribution du méthane (CH4) et la formation des polluants (NOx et CO).

La turbulence a été prise en considération en utilisant le modèle RANS (Reynolds Average Navier–Stokes) k-ε STANDARD. Tandis que la combustion a été étudié en utilisant le modèles ; Partially-Premixed

Mots clés : Hydrogène **;** Bruleur ; swril LsB ; Richesse ; Méthane ; Simulation

ABSTRACT :

This thesis is part of research on numerical simulation Adding hydrogen to the air / methane mixture in a swirl stabilized burner LSB (Low Swirl Burner). The burner nozzle has a radius of 25 mm and is made up of two distinct parts; the axial perforated plate with a radius of 15mm where the flow of the reactive premix is purely axial and the swirled annular space (10mm) where the flow of the reactive mixture is swirled.

The study focused mainly on the effect of adding hydrogen to methane (CH4) the richness is constant Φ = 0.6 we varied the percentage of hydrogen from 1% to 10% with a step from 1%. The number of swirls is constant S is 0.5.

Numerical simulation was performed in 2D where the effect of adding hydrogen was studied. Several parameters considered to be regulators of flame structures are analyzed and compared with the experimental results available in the literature namely; fields of speed, temperature, distribution of

methane (CH4) and the formation of pollutants (NOx and CO).

Turbulence was taken into account using the RANS model (Reynolds Average Navier – Stokes) k-ε STANDARD. While combustion has been studied using the models; Partially-Premixed

Keywords: Hydrogen ; Burner ; swirl LsB ; Wealth ; Methane ; Simulation

خلاصة:

هذه الرسالة جزء من بحث عن المحاكاة العددية إضافة الهيدروجين إلى خليط الهواء / الميثان في موقد دائري مثبّت LSB (موقد دوّامي منخفض). يبلغ قطر فوهة الموقد 25 مم وتتكون من جزأين متميزين ؛ الصفيحة المثقبة المحورية بنصف قطر 15 مم حيث يكون تدفق الخليط التفاعلي محوريًا تمامًا والفضاء الحلقي الملتف (10 مم) حيث يتم تدوير تدفق الخليط التفاعلي.

ركزت الدراسة بشكل أساسي على تأثير إضافة الهيدروجين إلى الميثان (CH4) حيث أن الثراء ثابت Φ = 0.6 قمنا بتغيير نسبة الهيدروجين من 1٪ إلى 10٪ بخطوة من 1٪. عدد الدوامات ثابت S يساوي 0.5.

تم إجراء محاكاة عددية ثنائية الأبعاد حيث تمت دراسة تأثير إضافة الهيدروجين. يتم تحليل العديد من المعلمات التي تعتبر منظمات لهياكل اللهب ومقارنتها مع النتائج التجريبية المتوفرة في الأدبيات وهي ؛ مجالات السرعة ودرجة الحرارة وتوزيع الميثان (CH4) وتكوين الملوثات (NOx و CO).

تم أخذ الاضطرابات في الاعتبار باستخدام نموذج k- RANS (Reynolds Average Navier - Stokes) STANDARD. بينما تمت دراسة الاحتراق باستخدام النماذج ؛ مخلوط جزئيًا

الكلمات المفتاحية :هيدروجين; حارق; swril LsB ; الثروة ;الميثان; محاكاة

sommaire

SOMMAIRE

Introduction générale : 1

CHAPITRE I : I Étude bibliographique

I Étude bibliographique 2

I.1 IntroductioN : 2

I.2 Déroulements chronologiques des recherches sur l'ajoute du mélange méthane/hydrogène dans un bruleur à swirl : 2

Conclusion 13

CHAPITRE II : LES IMPCTS DE L'AJOUT D'HYDROGENE DANS LE METHANE

II.1 Introduction 14

II.2 Définition de l'hydrogène et du méthane : 14

II.2.1 Définition d'hydrogène : 14

II.2.2 Définition du méthane : 14

II.3 Intérêt de l'ajout d'hydrogène : 14

II.3.1 Moteur à combustion interne : 15

II.3.2 Combustion pré mélangée sur des configurations de type « brûleurs » : 16

II.3.3 Etude des mélanges méthane - hydrogène 16

II.3.4 Impact de l'ajout d'hydrogène sur les émissions de NOx : 17

II.3.5 Impact de l'ajout d'hydrogène sur la recirculation des produits de combustion et sur la température du four : 20

II.4 Limites d'inflammabilité et mécanisme d'extinction : interaction chimie/turbulence : 22

II.4.1 Influence de l'ajout d'hydrogène sur la structure et la position des zones de réaction : 23

II.4.2 Influence de l'ajout d'hydrogène sur les températures et les concentrations des fumées : 24

II.4.3 Influence de l'hydrogène sur la concentration des fumées : 29

II.4.4 Influence du diamètre d'injection du combustible : 31

Conclusion : 35

CHAPITRE III : PROCEDURE NUMERIQUE

III Procédure de résolution par FLUENT 36

III.1 Introduction 36

III.2 Le préprocesseur ANSYS 36

III.2.1 Géométrie du bruleur : 36

III.2.2 Structure et test de maillage : 37
III.2.3 Lancement du FLUENT :..... 38
III.2.4 Définir les conditions aux limites et opérateurs : 39
III.2.5 Equation du mélange hydrogéné méthane : 42
Conclusion : 43

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSIONS

IV.1 Introduction :..... 44
IV.1.1 L'influence de l'ajout d'hydrogène : 44
IV.1.2 Paramètres du problème :..... 44
IV.2 Validation : 44
IV.2.1 Validation des profils de températures :..... 45
IV.2.2 Validation des profils de vitesses axiales :..... 45
IV.2.3 Validation de la distribution du CH4 48
IV.3 Effet de la variation de l'hydrogène : 51
IV.3.1 Effet de l'hydrogène sur la température :..... 51
IV.3.2 Effet de l'hydrogène sur la vitesse axiale :..... 54
..... 56
IV.4 Effet de l'ajoute de l'hydrogène sur les espèces chimiques :..... 57
IV.4.1 Effet de l'ajoute de l'hydrogène sur le CH4 :..... 57
IV.4.2 Effet de l'ajoute de l'hydrogène sur le NOX :..... 60
IV.4.3 Effet de l'ajoute de l'hydrogène sur le CO2 :..... 63
IV.4.4 Effet de l'ajoute de l'hydrogène sur le CO :..... 66
IV.4.5 Effet de l'ajoute de 0% d'hydrogène (CH4 pur) :..... 69
IV.5 Conclusion : 75

LISTES DES FIGURES

Figure I-1: Effect of hydrogen addition on NO mass fraction at the flame axis.....3
Figure I-2: Effect of hydrogen addition on NO mass fraction.....3
Figure I-3: Setup of Experimental Apparatus b. LSB 5
Figure I-4: Cylindrical computational domain and mesh containing 1,638,400 cells used in the LES predictions of the turbulent premixed Bunsen-type flames 6
Figure I-5: Flame surface density for a 2.54 cm LSB and a 3.81 cm LSB with a consistent 100% CH4 fuel mixture.....7
Figure I-6: Flame surface density for a consistent fuel mixture of 80% CH4 and 20% H2.....7
Figure I-7: Swirled injector – new type, constant radial exist section 9
Figure I-8: swirled injector-classical type 10
Figure I-9: Swirled injector-new type 10
Figure I-10: CAD geometry of the premixed burner 11
Figure I-11: Swirl insert géométrie 12
Figure I-12: Schematic of the swirl burner; (b) A digital image of the flame and (c) A photo of upper part of the burner; (d): Swirler vans. 13

Figure II. 1 les émissions de NOx en fonction d'hydrogène.....18
Figure II. 2 réalisées sur mesures l'installation de combustion sans flamme 19
Figure II. 3 Emissions de NOx en combustion sans flamme (a) méthane pur (b) hydrogène pur.....19
Figure II. 4 « Clean mild combustion » pour le méthane pur, et deux mélanges méthane/hydrogène.....20
Figure II. 5Champs de température pour (a) le méthane en combustion classique et (b) sans flamme et (c) un mélange 21
Figure II. 6Distribution de température pour différentes compositions du carburant :(a) 0% H2; (b) 4.8% H2; (c) 11.2 % H2 22
Figure II. 7 Evolution de l'intensité des zones de réaction et du signal des parois en fonction du pourcentage d'hydrogène dans le mélange combustible 23
Figure II. 8P=18.6kW Ta=565°C, diamètre injecteur de combustible =3mm.....24
Figure II. 9Température des parois et des fumées. 25
Figure II. 10Concentration des fumées.....25
Figure II. 11Pouvoir fumigène : volume des fumées sèches et humides.....27
Figure II. 12Evolution du taux de recirculation dans le four en fonction du pourcentage volumique d'hydrogène dans le mélange combustible.....27
Figure II. 13Concentrations des fumées 28
Figure II. 14Température des parois et des fumées.....29
Figure II. 15P=20kW, d=3mm.....29
Figure II. 16Concentration des fumées, P=18.6kW, Ta=25°C, d=3mm. 30
Figure II. 17Evolution du taux de recirculation dans le four en fonction du pourcentage volumique d'hydrogène dans le mélange combustible.....31
Figure II. 18Images moyennes de chimiluminescence OH*, cas avec préchauffage de l'air. .33
Figure II. 19Images moyennes de chimiluminescence OH*, cas sans préchauffage de l'air. ..33

Figure III.1Structure du domaine de calcul 37
Figure III.2 Structure du maillage 37
Figure III.3 Température sur l'axe du bruleur pour différents nombres de nœuds 38

Figure IV.1 valaditon des profils de témperature 45
Figure IV.2 valaditon des profils de vitesse axial pour x/d=0.2 46
Figure IV.3 valaditon des profils de vitesse axial pour x/d=0.4 46
Figure IV.4 valaditon des profils de vitesse axial pour x/d=0.6 47
Figure IV.5 valaditon des profils de vitesse axial pour x/d=0.8 47
Figure IV.6 valaditon des profils de vitesse axial pour x/d=1 47
Figure IV.7 valaditon des profils de distrbution du CH4 pour x/d=0.2 48
Figure IV.8valaditon des profils de distrbution du CH4 pour x/d=0.4 49
Figure IV.9 valaditon des profils de distrbution du CH4 pour x/d=0.6 49
Figure IV.10 valaditon des profils de distrbution du CH4 pour x/d=0.8.....50
Figure IV.11valaditon des profils de distrbution du CH4 pour x/d=1 50
Figure IV.12 les contours de température pour 1% d' H2.....51
Figure IV.13 les contours de température pour 2% d' H2.....51
Figure IV.14 les contours de température pour 3% d' H2.....51
Figure IV.15 les contours de température pour 4% d' H2.....51
Figure IV.16 les contours de température pour 5% d' H2.....52
Figure IV.17 les contours de température pour 6% d' H2.....52
Figure IV.18 les contours de température pour 7% d' H2.....52
Figure IV.19 les contours de température pour 8% d' H2.....52
Figure IV.20 les contours de température pour 9% d' H2.....52
Figure IV.21les contours de température pour 10% d' H2.....52
Figure IV.22 Effet de l'hydrogéne sur le profil de témperature 53
Figure IV.23 Effet de l'hydrogéne sur le profil de témperature 53
Figure IV.24les contours de vitesse pour 1% d' H2.....54
Figure IV.25les contours de vitesse pour 2% d' H2.....54
Figure IV.26les contours de vitesse pour 3% d' H2.....54
Figure IV.27les contours de vitesse pour 4% d' H2.....54
Figure IV.28les contours de vitesse pour 5% d' H2.....54
Figure IV.29les contours de vitesse pour 6% d' H2.....54
Figure IV.30les contours de vitesse pour 7% d' H2.....55
Figure IV.31les contours de vitesse pour 8% d' H2.....55
Figure IV.32les contours de vitesse pour 9% d' H2.....55
Figure IV.33les contours de vitesse pour 10% d' H2.....55
Figure IV.34 effet de l'hydrogéne sur la vitesse axial 55
Figure IV.35 effet de l'hydrogéne sur la vitesse axial 56
Figure IV.36 les contours de CH4 pour 1% d' H2.....57
Figure IV.37 les contours de CH4 pour 2% d' H2.....57
Figure IV.38 les contours de CH4 pour 3% d' H2.....57
Figure IV.39 les contours de CH4 pour 4% d' H2.....57
Figure IV.40les contours de CH4 pour 5% d' H2.....57
Figure IV.41 les contours de CH4 pour 6% d' H2.....57
Figure IV.42 les contours de CH4 pour 7% d' H2.....58
Figure IV.43 les contours de CH4 pour 8% d' H2.....58
Figure IV.44 les contours de CH4 pour 9% d' H2.....58
Figure IV.45les contours de CH4 pour 10% d' H2.....58

Figure IV.46 Effet de l'hydrogène sur la fraction massique du CH4 58
Figure IV.47 Effet de l'hydrogène sur la fraction massique du CH4 59
Figure IV.48 les contours de NOX pour 1% d' H2.....60
Figure IV.49 les contours de NOX pour 2% d' H2.....60
Figure IV.50 les contours de NOX pour 3% d' H2.....60
Figure IV.51 les contours de NOX pour 4% d' H2.....60
Figure IV.52 les contours de NOX pour 5% d' H2.....60
Figure IV.53 les contours de NOX pour 6% d' H2.....60
Figure IV.54 les contours de NOX pour 7% d' H2.....61
Figure IV.55 les contours de NOX pour 8% d' H2.....61
Figure IV.56 les contours de NOX pour 9% d' H2.....61
Figure IV.57 les contours de NOX pour 10% d' H2.....61
Figure IV.58 effet de l'hydrogéne sur la fraction massique de NOX 61
Figure IV.59 les contours de CO2 pour 1% d' H2.....63
Figure IV.60 les contours de CO2 pour 2% d' H2.....63
Figure IV.61 les contours de CO2 pour 3% d' H2.....63
Figure IV.62 les contours de CO2 pour 4% d' H2.....63
Figure IV.63 les contours de CO2 pour 5% d' H2.....63
Figure IV.64 les contours de CO2 pour 6% d' H2.....63
Figure IV.65les contours de CO2 pour 7% d' H2.....64
Figure IV.66les contours de CO2 pour 8% d' H2.....64
Figure IV.67les contours de CO2 pour 9% d' H2.....64
Figure IV.68les contours de CO2 pour 10% d' H2.....64
Figure IV.69 effet de l'hydrogéne sur la fraction massique de CO2 64
Figure IV.70 effet de l'hydrogéne sur la fraction massique de CO2 65
Figure IV.71 les contours de CO pour 1% d' H2.....66
Figure IV.72 les contours de CO pour 2% d' H2.....66
Figure IV.73 les contours de CO pour 3% d' H2.....66
Figure IV.74 les contours de CO pour 4% d' H2.....66
Figure IV.75 les contours de CO pour 5% d' H2.....66
Figure IV.76 les contours de CO pour 6% d' H2.....66
Figure IV.77 les contours de CO pour 7% d' H2.....67
Figure IV.78 les contours de CO pour 8% d' H2.....67
Figure IV.79 les contours de CO pour 9% d' H2.....67
Figure IV.80 les contours de CO pour 10% d' H2.....67
Figure IV.81 effet de l'hydrogéne sur la fraction massique de CO 68
Figure IV.82 Effet de 0% l'hydrogène sur le profil de température 69
Figure IV.83 les contours de Température pour 0% d' H2 69
Figure IV.84 Effet de 0% l'hydrogène sur la vitesse axial 70
Figure IV.85les contours de vitesse pour 0% d' H2.....70
Figure IV.86Effet de 0% l'hydrogène sur la fraction massique du CH4 71
Figure IV.87les contours du CH4 pour 0% d' H2.....71
Figure IV.88 Effet de 0% l'hydrogène sur la fraction massique du NOX.....72
Figure IV.89 les contours du NOX pour 0% d' H2.....72
Figure IV.90Effet de 0% l'hydrogène sur la fraction massique du C02 73
Figure IV.91les contours du CO2 pour 0% d' H2.....73
Figure IV.92Effet de 0% l'hydrogène sur la fraction massique du C0 74

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II. 1 Propriétés chimiques du méthane et de l'hydrogène (source Association Française de l'Hydrogène). 17

Tableau III. 1Conditions opératoires 1 39
Tableau III. 2 Conditions aux limites à l'entrée d'air 41
Tableau III. 3 Conditions aux limites sur la 1a plaque perforée 41
Tableau III. 4 Conditions aux limites sur l'espace annulaire swirlé. 42
Tableau III. 5 Les fractions molaires du ch4 et du N2 et O2 et du H2 par rapport au différent pourcentage d'hydrogène. 43

Introduction générale

Depuis l'antiquité l'homme n'a cessé d'utiliser la combustion. Il utilisa le feu pour se nourrir, se réchauffer et pour se défendre. Aujourd'hui, la vie humaine est basée sur la combustion comme sur l'air et l'eau. Nos progrès dépendent de plus en plus sur la combustion qui occupe une place importante pour la production d'énergie à partir des combustibles fossiles dont les ressources sont limitées. Cependant, la combustion de ces hydrocarbures tels que le méthane entraîne la Production d'espèces polluantes pour l'environnement, et la sévérité des normes antipollution qui deviennent de plus en plus exigeantes poussent les industriels du secteur de l'énergie à Entreprendre des recherches pour perfectionner les procédés de combustion et de réduction de consommation en combustible et de limiter les émissions polluantes, en particulier les NOX et le CO.

La sévérité des normes antipollution qui deviennent de plus en plus exigeantes poussent les scientifiques à entreprendre des recherches d'optimisation et de réduction des émissions polluantes, en particulier les NOx et le CO. Les bruleurs à faible tourbillon offrent des résultats des plus satisfaisants sur la réduction des émissions polluantes et à la préservation des installations industrielles de par sa technique de stabilisation des flammes.

Les polluants tel que le CO et NOX peuvent être réduit avec la bonne maitrise de la combustion tel que le changement de diamètre et géométrie du bruleur et diminution de la richesse du mélange réactif ou diminuer le nombre de tourbillon (swril) ou avec un enrichissement en hydrogène parfait.

Le présent travail s'inscrit dans les études de simulation numériques utilisant le logiciel ANSYS Fluent 17.0 (2017). La recherche se diriger sur l'effet de l'ajoute du mélange d'hydrogène/méthane dans un bruleur à swirl prémélangé avec des différents pourcentages d'hydrogène.

Ce mémoire se compose de quatre chapitres :

Chapitre 1 : le premier chapitre traite tous qui concerne l'étude bibliographique sur l'ajoute Du mélange méthane/hydrogène dans un bruleur à swirl de 2012 jusqu'à 2020. Différents travaux ont été cités dans un ordre chronologique.

Chapitre2 : les impacts de l'ajout d'hydrogène dans le méthane

Chapitre 3 : Procédure numérique

Chapitre 4 : résultats et discussion.

CHAPITRE I

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I Étude bibliographique

I.1 INTRODUCTION :

Cette étude bibliographique est une synthèse des travaux portes sur l'ajoute du mélange méthane/hydrogène dans un bruleur à swirl sur les flammes prémélange. Elle se compose de recherches numériques, expérimental. Ces rechercher décrivant la géométrie du bruleur, les techniques de stabilisation de la flamme, les émissions polluantes, le comportement des flammes en régime pauvre et en régime riche.

Dans un autre coté les recherches montrent essentiellement les différentes géométries d'un bruleur a swirl et les différents dosages de l'ajoute de l'hydrogène pour minimiser les émission polluants (effet de serre) et les différents types de mesure d'émissions polluants.

Les chercheurs ils ont utilisé différentes méthodes mais leur but est le même qui est :

-la réduction des émissions polluants.

-La compréhension du comportement des flammes (instabilités, forme).

-développement d'un bruleur a swirl optimise pour l'ajoute de l'hydrogène.

-l'augmentation de la vitesse et la température.

I.2 Déroulements chronologiques des recherches sur l'ajoute du mélange méthane/hydrogène dans un bruleur à swirl :

MajedEmadi 2012

Dans cette bibliographie, ils ont étudié les limites d'inflammabilité d'un bruleur a faible swirl dans diverses conditions de fonctionnement et l'effet de la pression et la géométrie d'un bruleur avec le pourcentage d'hydrogène (ajout au combustible) tout l'étude à était fait à l'aide d'OH PLIF image les résultats montre que l'ajout de l'hydrogène et l'augmentation de pression élargissant la gamme de stabilité et augment le taux de combustion locaux et globaux en raison de la vitesse de réaction plus rapide de l'hydrogène .

L'ajout l'hydrogène augmente la réactivité des réactifs et la vitesse de la flamme turbulente. [1]

BehzadRohani,KhalidM.Saqr2012 [2] :

Ils ont présente une étude expérimentale sur l'effet de l'ajout de l'hydrogène sur la température et les émissions polluants du méthane/air dans un bruleur a swirl a grande turbulence, le pourcentage de

l'hydrogène dans la carburant varie de 0% à 50% du volume du carburant, ils ont constaté dès que la concentration d'hydrogène augmente la distribution de la température dans la région de la flamme devient plus inégal par rapport à la flamme du méthane pur, la production totale de No est augmentée par l'ajout de l'hydrogène la figure 1 et 2 le montre. [2]

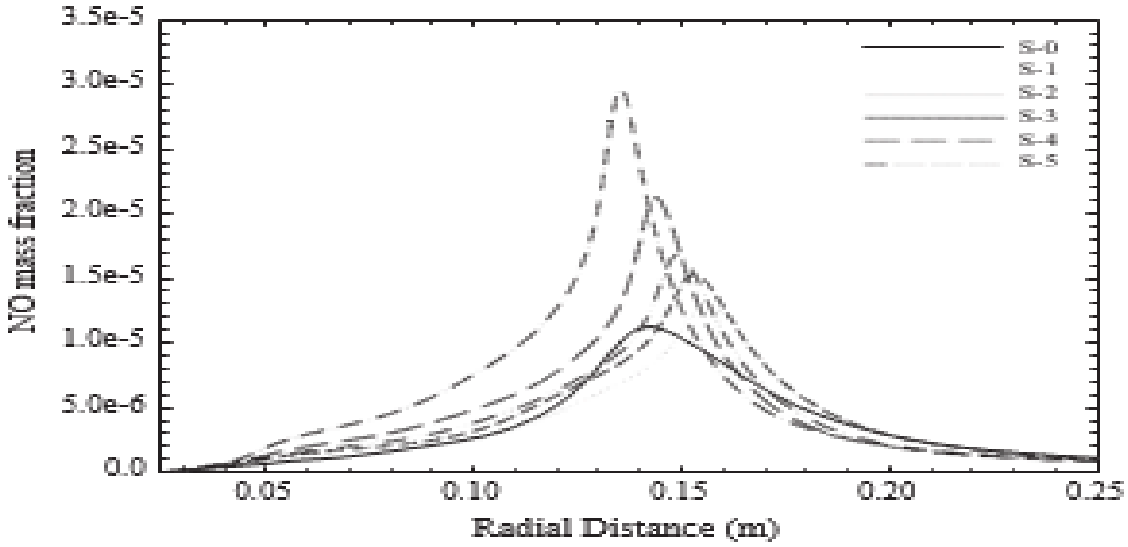

Figure I-1: Effect of hydrogen addition on NO mass fraction at the flame axis

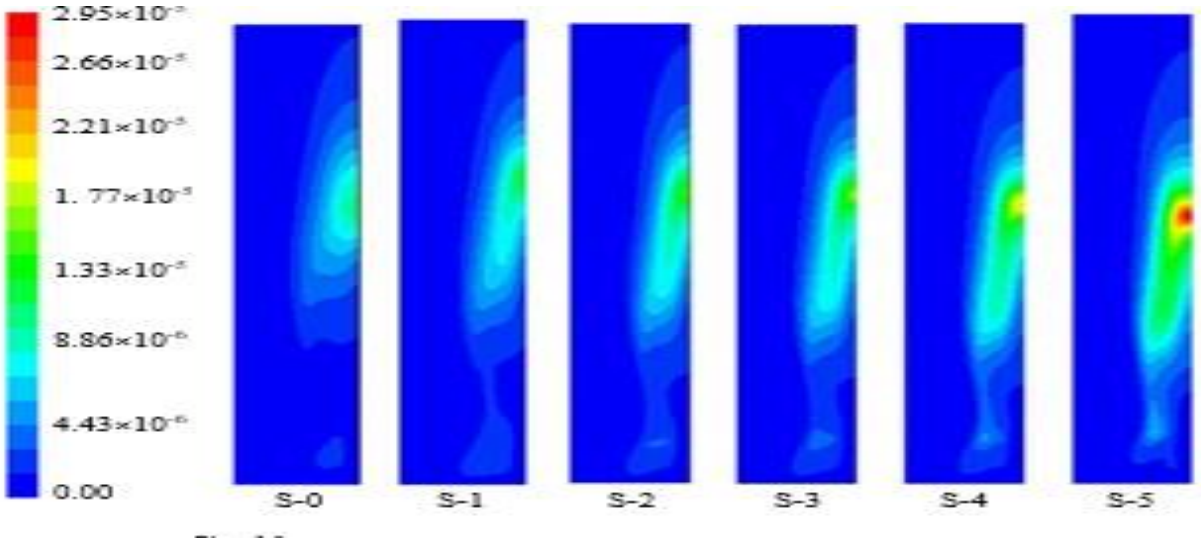

Figure I-2: Effect of hydrogen addition on NO mass fraction

Madjd emadi, Douglas karkow,Taleb Salemah 2012

Ils ont examiné comment la dynamique de la flamme change en réponse à l'ajout systématique de

l'hydrogène dans un bruleur de méthane air pauvre prémélange à faible turbulence l'enrichissement en hydrogène du méthane et l'augmentation de la pression font que les limites de soufflage se produisant à un rapport d'équivalence plus faible, ce qui élargit la gamme de stabilité.
L'ajout en hydrogène à un effet plus important sur le plissement de la flamme que les pressions les plus élevé. [3]

Khalid M. Saqr and Mazlan A. Wahid2012

Dans une étude de simulation numérique de l'entropie de la flamme CH_4 /AIR stabilisée par tourbillonnement dû à l'ajout d'H_2 au flux de combustible, la simulation numérique a été validée en comparant les profiles calculés de la vitesse et de la fraction de mélange.il a été constaté que l'enrichissement en hydrogène entraine une augmentation de taux de génération de l'entropie de la flamme. [4]

YunFei Yan, Wenli Pan, Li Zhang2013

Dans une étude de simulation numérique de basse sur la dynamique des fluides (CFD) s'est avérée être une approche efficace pour analyser les performances de la combustion dans divers condition l'objectif de cet article est d'étudier la combustion catalytique du méthane assistée par l'hydrogène.
La température d'allumage diminue considérablement lorsque la teneur en hydrogène de combustible augmenté.
Le méthane ne peut pas être brule de manière régulière mais l'hydrogène ajoute au méthane peut être enflamme.
Le mélange hydrogéné méthane favorise l'allumage et les tiges catalytiques peuvent catalyser la combustion du méthane. [5]

Andres Colorado, Vincent Mcdoneli2013

Dans cette bibliographie, ils ont analysé les émissions du NO_2 par rapport des compostions de combustible le premier c 'est du méthane pur le second est un mélange hautement réactif de 90% H_2 et 10% CH_4.
L'effet de l'ajout d'hydrogène aux mélanges ultra maigre et les caractéristiques de l'émission NOX de manière expérimentale et par la simulation numérique.
Deux méthodes numériques permettant de prédire les émissions de NOx d'un LSB alimenté au gaz naturel et d'un carburant enrichi à l'hydrogène ont été testées dans le cadre de cette étude. La première méthode est le modèle NOx post-processus, qui base ses résultats sur l'équilibre et l'équilibre partiel des réactifs, et un modèle PSR utilisant quatre mécanismes de réaction complets (GRI Mech 3.0, USCMech, Konnov 0.5 et Galway III). Le modèle NOx post-procédé n'a pas été capable de prédire les

changements drastiques des émissions de NOx détectés lors de l'augmentation du niveau d'hydrogène jusqu'à 90% en volume, ce qui indique qu'un mécanisme de réaction est nécessaire pour prédire avec précision les taux de formation de NOx. Quel que soit le mécanisme de combustion, le modèle PSR a pu détecter et prédire les changements significatifs sur les émissions lors de la modification de la composition du combustible ; il n'a pas été possible de conclure quel mécanisme de réaction est le plus précis car les effets de la recirculation des gaz d'échappement et des pertes de chaleur du réacteur n'ont pas été pris en compte. [6]

Kelsey Kaufman, Albert ratner2013

Ils ont examiné l'effet de l'ajout d'hydrogène au carburant méthane sur les acoustiquement actives est examiné. Les flammes étudiées ont été produits à l'aide d'un bruleur à faible tourbillon 3.81 cm ayant une vitesse de sortie du bruleur de 10m/l'examen de l'effet de l'addition d'hydrogène sur la densité.

L'examen de l'effet de l'addition d'hydrogène sur la densité de surface de la flamme a montré que dans tous les cas, la FSD présente un comportement parabolique. À mesure que la concentration d'hydrogène dans le mélange de carburant augmentait, la FSD augmentait également. Les valeurs maximales de FSD augmentaient avec la concentration d'hydrogène et la pression, et la pente de la relation FSD maximale augmentait.

Lorsque des perturbations acoustiques ont été introduites dans le système de combustion, il a été observé que le bruit présent dans les cas d'hydrogène-méthane était inférieur à celui des cas de méthane pur. L'effet de couplage entre les fluctuations de pression et le dégagement de chaleur instable a été observé comme étant moins cohérent dans les flammes d'hydrogène-méthane que dans les flammes de méthane pur. [7]

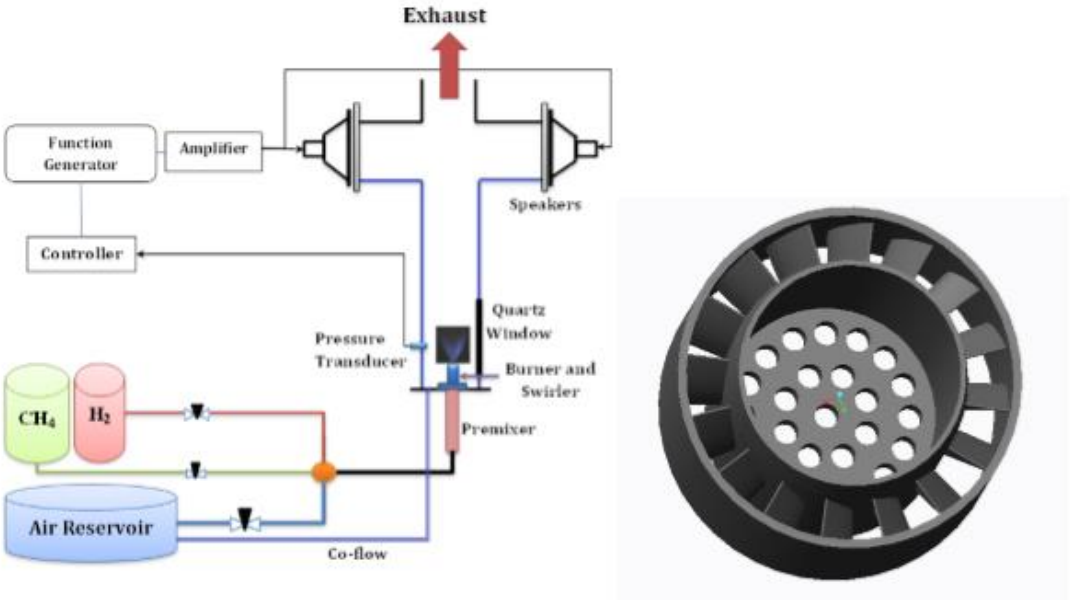

Figure I-3: Setup of Experimental Apparatus b. LSB

Francisco E, Hernandez-Pérez, Omar L2013

Dans une étude de simulation numérique sur les grandes émissions (LES) à la prédiction de la combustion prémélange turbulente du méthane /air pauvre enrichi en H_2. La flamme enrichie contient 20% H_2 en termes de fraction molaire.

L'ajout de H_2 diminue la hauteur de la flamme et élargit les fonctions de densité de probabilité de courbure. La flamme enrichie présente un degré de plissement plus élevé avec des arrêtes plus nette de courbure négative et des poches plus grandes de courbure positive. [8]

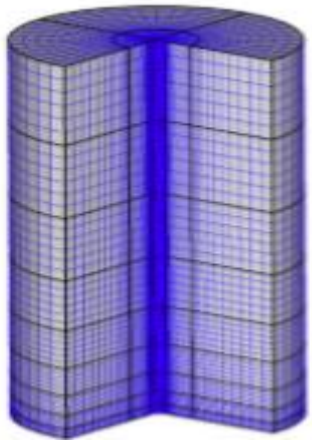

Figure 0-4: Cylindrical computational domain and mesh containing 1,638,400 cells used in the LES predictions of the turbulent premixed Bunsen-type flames

.

Kelsey Leigh Kaufman 2014

Ils ont présente une étude expérimentale sur l'ajout de l'hydrogène dans un bruleur (LSB), les résultats montrent un LSB 2.54 cm et 3.81 cm pour l'instabilité thermo-acoustique en utilisant les techniques de diagnostic OH-PLIF

Les résultats des cartes de densité du spectre de puissance ont montré que pour chaque mode de résonance la plage de sensibilité applicable s'est élargie de 60% la raison de l'augmentation de la taille de la flamme présente dans le bruleur de 3.81 cm. [9]

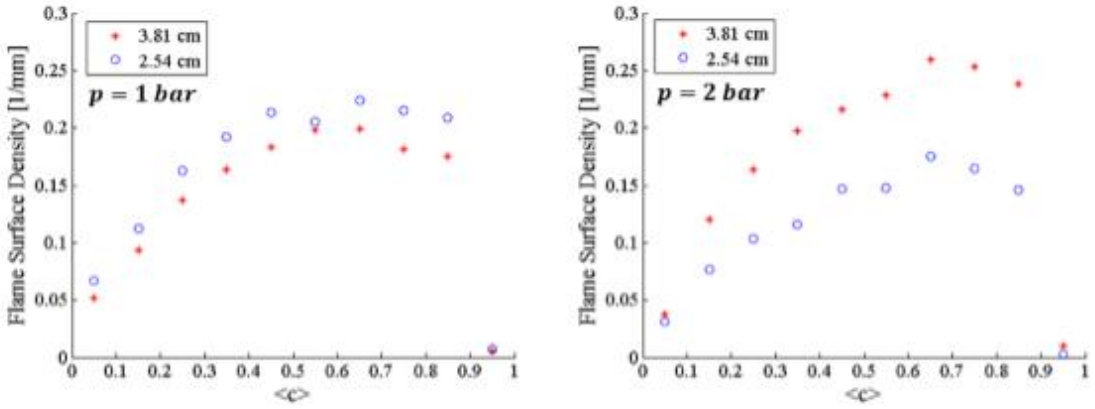

Figure I-5: Flame surface density for a 2.54 cm LSB and a 3.81 cm LSB with a consistent 100% CH4 fuel mixture

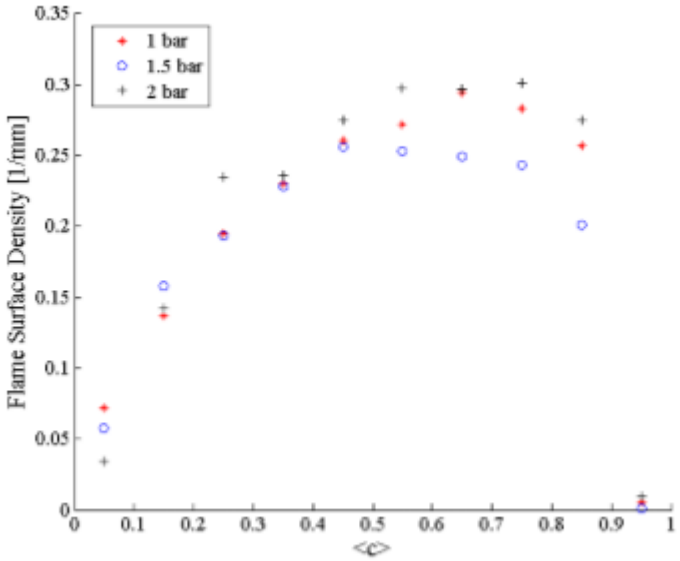

Figure I-6: Flame surface density for a consistent fuel mixture of 80% CH4 and 20% H2

AbdelBaki Mamei 2015

Cette étude vise à complète les résultats des essais expérimentaux les effets de la richesse du mélange et l'ajout de l'hydrogène sur la structure et la formation des polluants l'augmentation de la richesse du combustible permet de stabiliser la flamme, mais augmente la température et produit plus de CO, CO2, et NOx.

Par contre, l'addition de H2 augmente l'efficacité du mélange, stabilise la flamme avec une légère élévation de la température maximale et une diminution des fractions massiques de CO,CO2, et NOx.

Le remplacement d'une fraction de 10% ou même 20% du gaz principal par l'hydrogène améliore les performances des installations nécessite aucune modification sur les systèmes de combustion. [10]

Babak Kashir, Sadegh Tabejamaat, Nafiseh Jalalatian2015

Cette étude est menée en deux étapes, dans un premier temps une approche couplée flamme/radiation ainsi que deux modèles de turbulence distincts. Les modèles de turbulence sont k-u-SST et k-ε dans la deuxième partie le modèle k-ε modifie est utilisé pour étudier la structure et la caractéristique de combustion des flammes de mélange CH4 H2 sous des nombres de tourbillons distincts trois nombre de tourbillons différents.

Les nombre 0.3,0,5et0,6 en font l'objet d'une enquête, l'ajout d'hydrogéné au mélange de carburant à un débit volumétrique total fixe réduit à le débit massique du carburant et la puissance thermique. Cela se traduit par une réduction de la température des produits de combustion dans la zone de recirculation en amont. On constate que le monoxyde de carbone est réduit par l'ajout d'hydrogène. [11]

HarunYilmaz,SelimTangoz 2017

Cette étude vise à présenter les résultats de la modélisation de la combustion hydrogène/air dans une chambre de combustion micro cylindre.

L'évaluation des performances de ces modèles a été effectuée en examinant la distribution de la température de la paroi extérieure de la chambre de combustion

Les résultats ont montré les modèles de turbulence sont très sensible. Le modèle de turbulence doit être correctement choisi pour que le problème soit résolu. [12]

Razvan Carlanescu, TudorPrisecaru,Andreea Mangra2017

Les travaux présentes dans ce document partent de la recherche de nouveau carburant plus écologiques et plus efficace.

Cet article présente un nouveau type d'injecteur développe pour la combustion de carburant partiellement prémélange hydrogène méthane des proportions divers.

Il a été conclu qu'une nouvelle solution était nécessaire, une nouvelle idée a vu le jour ,un injecteur tourbillonnaire à section de sortie radiale constante ,qui a été produit à partir d'un alliage de titane, le nouveau type d'injecteur a été teste sur un banc d' essai basse pression avec le carburant méthane/hydrogène, les résultats ont confirmé la possibilité de développement et d' améliorer le nouveau type d' injecteur a tourbillon ils ont montré des bonnes limites d'éruption par rapport aux résultats connu de la littérature. Les valeurs de NOX sont les résultats qu'ils attendent, relativement adéquats compte tenu du prémélange.la figure 7 montre le nouveau injecteur à swirl. [13]

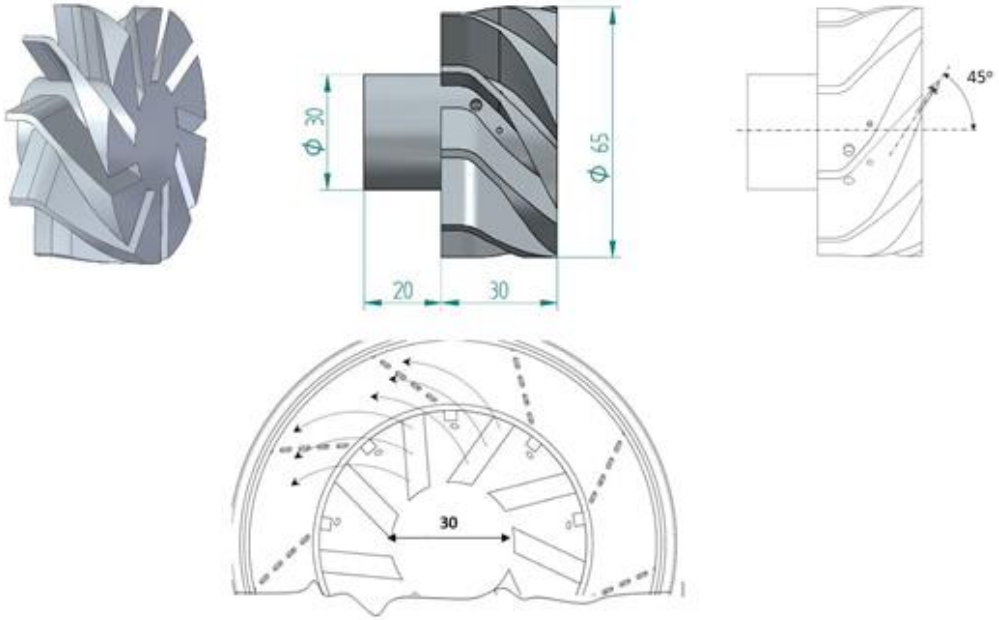

Figure I-7: Swirled injector – new type, constant radial exist section

Tudor Prisecaru, Luliana Soriga2018

Cette article présente un nouveau type d'injecteur brevette conçu pour la combustion du carburant prémélange hydrogène-méthane dans différentes proportions.

Différentes études tentent de confirmer la possibilité de transporter l'hydrogène en utilisant le réseau de distribution de gaz naturel existant, en mélangeant les deux gaz. Comme les propriétés du nouveau mélange influencent les paramètres de combustion, l'utilisation de l'équipement existant poserait de nouveaux problèmes, comme le risque de retour de flamme, les effets des températures plus élevées et la modification du front de flamme.

Les premières expériences ont montré qu'une flamme de travail stable et efficace peut être obtenue avec le nouveau type d'injecteur et ont conduit à de nouvelles idées pour le développement futur de l'assemblage et pour l'amélioration de l'injecteur à tourbillon. Les figures 8et 9 montre l'injecteur classique et nouveau type d'injecteur. [14]

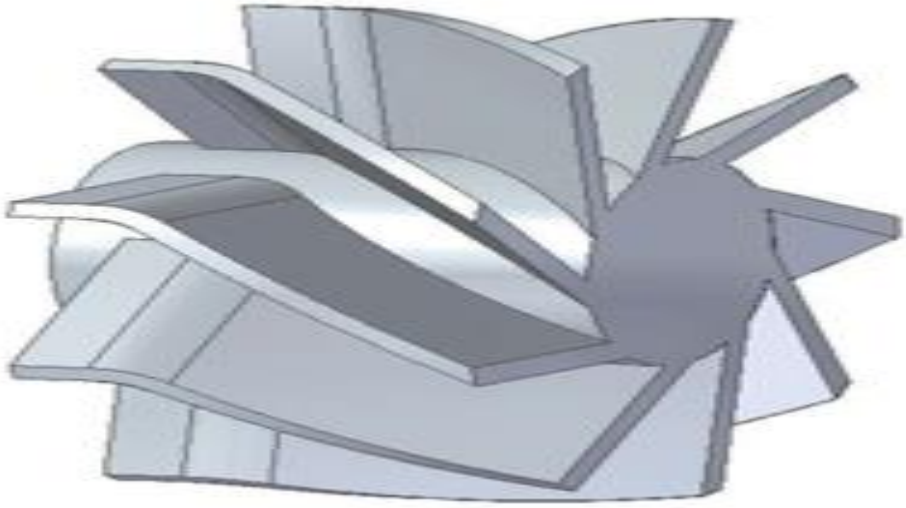

Figure I-8: swirled injector-classical type

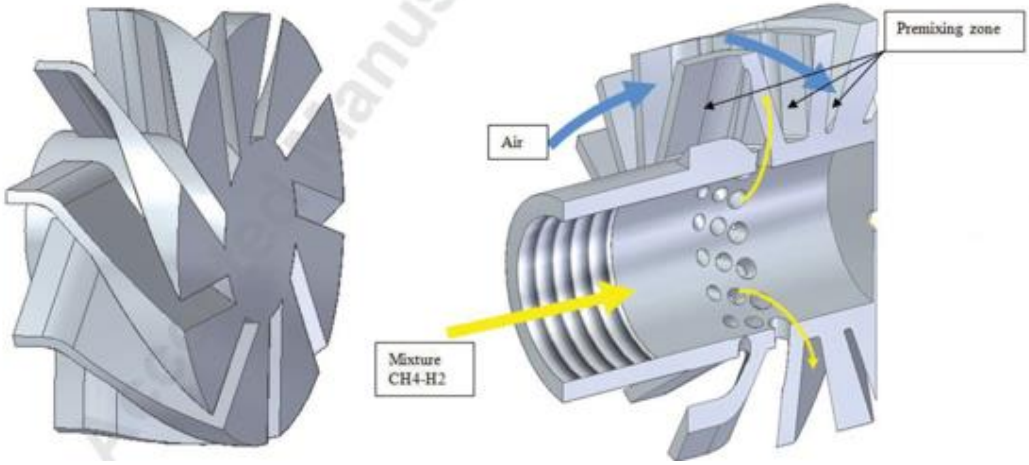

Figure I-9: Swirled injector-new type

Parag Rajpara, Rupesh Shah, Jyotirmay Banerjee2018

C'est une étude expérimental d'une chambre de combustion à tourbillon air/méthane quasi cubique, cette recherche vise à évaluer le potentiel de l'hydrogène sous la forme d'un carburant souple pour accélérer la chimie de la combustion et réduire les émissions de CO du méthane alimentant la chambre de combustion d'une turbine à gaz à tourbillonnement.

Ajout d'hydrogène à un apport d'énergie thermique fixe et ajout d'hydrogène à un débit volumétrique total de carburant fixe. Les principaux résultats des recherches actuelles sont les suivants :

-l'addition d'hydrogène au méthane augmente la vitesse et la température des gaz du bruleur. Une augmentation de la fraction molaire des radicaux libres avec l'enrichissement en hydrogène.

-l'enrichissement en hydrogène diminuent La vitesse axiale et la vitesse des réactions chimique, par conséquent la réduction de l'espèce générée par le carbone CH4, CO et CO2.

Le niveau d'émission de CO est considérablement réduit avec une augmentation marginale de l'émission de NOx avec l'enrichissement en hydrogène. [15]

Murat Umut Yangaz, Mehmed Rafet Özdemir & Ramazan Şener2019

Dans cette étude, l'effet de l'ajout d'hydrogène à différents combustibles gazeux à différents taux a été étudié dans un brûleur à prémélange. Une étude paramétrique numérique a été réalisée à l'aide d'un code CFD commercial. Les combustibles gazeux, à savoir le méthane, le propane, le GPL et le gaz naturel, ont été enrichis par différents taux d'ajout d'hydrogène avec un incrément de 10 %. En outre, les résultats de l'hydrogène pur ont été présentés :

Les résultats révèlent que l'efficacité de la combustion de tous les combustibles a été positivement affectée par l'enrichissement en hydrogène, sauf pour certaines compositions de gaz. En outre, cette étude a montré que l'ajout d'hydrogène en général, diminue les émissions de HC et de CO non brûlés.

Les résultats montrent que l'addition d'hydrogène augmente légèrement l'efficacité de la combustion pour tous les combustibles, qui est proche de 0,5 %. Sur d'autre part, les niveaux d'efficacité globale en ce qui concerne l'énergie de chauffage utile sont variant entre 4 et 9 % pour tous les carburants sauf le biogaz. Les rendements globaux dès Les cas de biogaz se situent dans une fourchette de 35 à 88 %. Hormis quelques cas, les HC et CO diminue à mesure que le taux d'addition d'hydrogène augmente.la figure 10 montre le nouveau type de bruleur. [16]

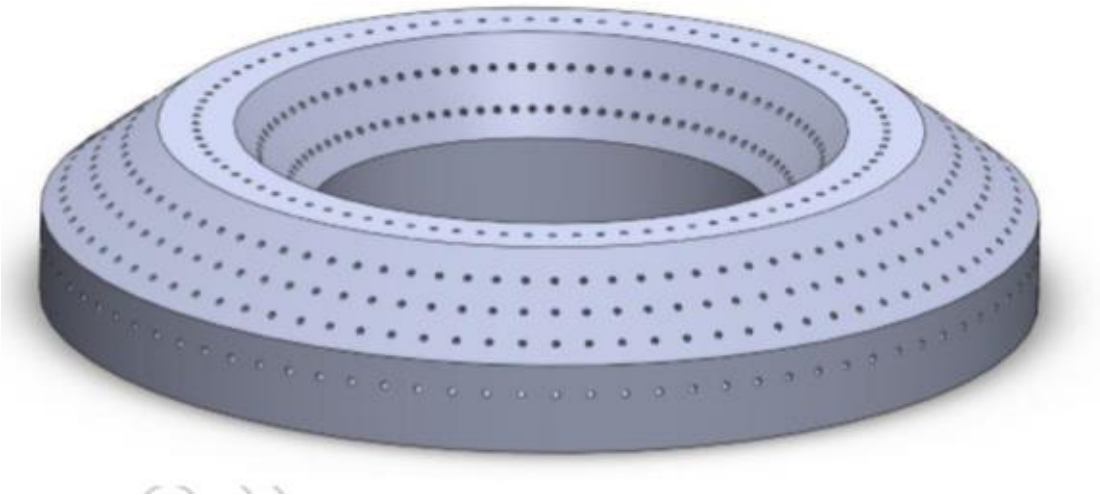

Figure I-10: CAD geometry of the premixed burner

Mohammed H. Abdulsada 2020

Cette étude explique en détail les résultats expérimentaux du modèle de bruleur a tourbillon utilisant de l'hydrogéné pur et des mélanges du méthane enrichis en hydrogène.

En autre, cet article aborde les problèmes de retour de flamme et de soufflage et la possibilité de changer de combustible.

Les limites de retour de flamme et de soufflage sont considérablement affectées par le nombre de tourbillons la géométrie, la forme de la configuration de la sortie d'échappement et le type de combustible.

L'augmentation du pourcentage d'hydrogène pur ou dans les gaz de cokerie augmente la tendance au retour de flamme car la turbulence augmente en raison de la faible densité totale du combustible.

Les limites d'extinction de la flamme (soufflage) s'améliorent avec la diminution du nombre de tourbillon car la turbulence réduit le temps nécessaire au soufflage.la figure 11 montre la nouvelle géométrie du bruleur a swirl. [17]

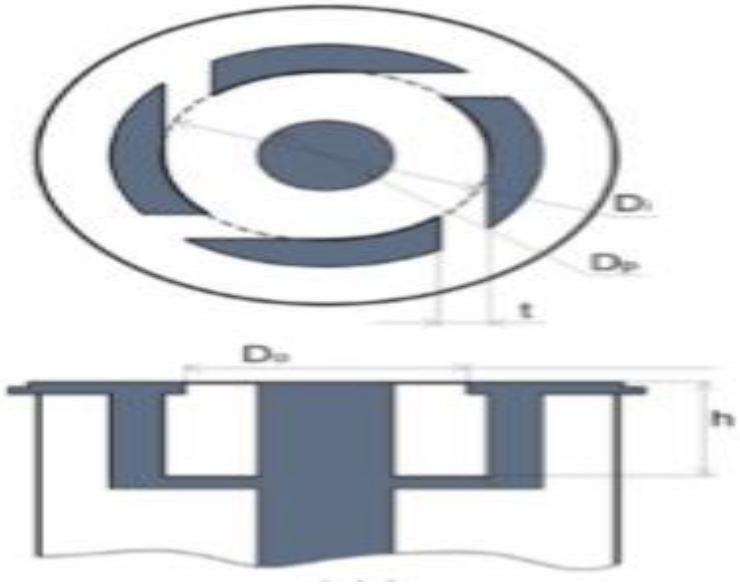

Figure I-11: Swirl insert géométrie

Shillong Guo, Weijie Zhang, Meng Zhang, Zuohua Huang 2020

Cette étude rapporte le mécanisme d'enrichissement de l'hydrogène dans la stabilisation de la flamme prémélangée pauvre CH4/AIR. Une grande simulation de tourbillon (LES) couplé à un modèle flamme épaissie.

Il a été constaté qu'une flamme plus robuste est obtenu et que le pinceau de la flamme a tendance à se dilater en direc tion radiale avec l'augmentation de la fraction d'hydrogène.

La fixation d'une flamme stabilisée par ch_4/air tourbillonnaire/corps de soufflet est intrinsèquement faible. L'ajout d'hydrogène modifie l'intensité de la combustion et les concentrations de radicaux à l'accrochage de la flamme de relativement faible à relativement forte. [18]

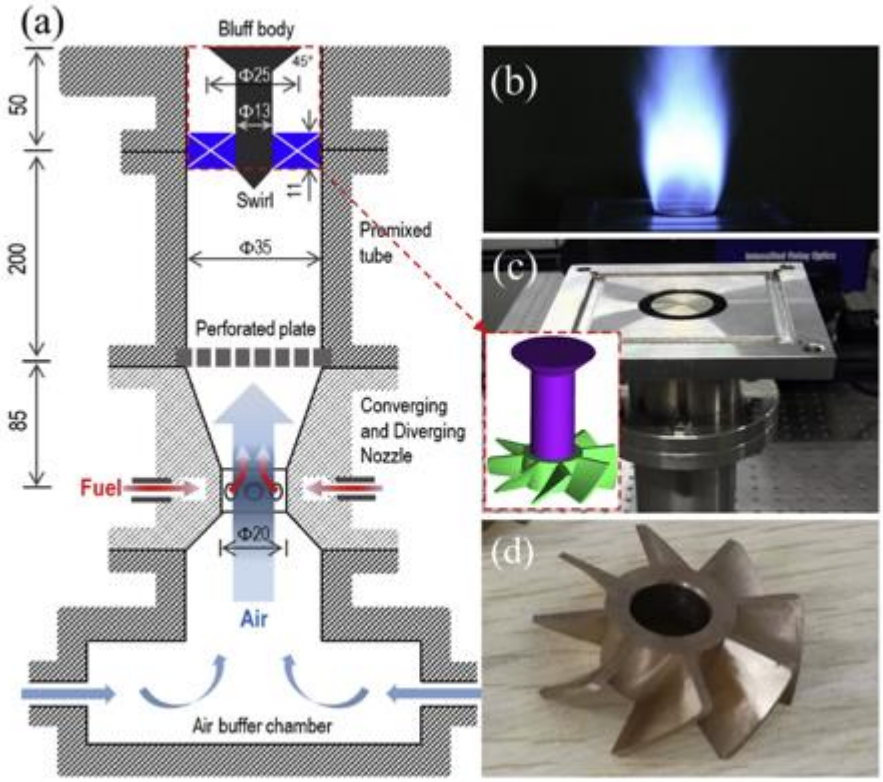

Figure I-12: Schematic of the swirl burner; (b) A digital image of the flame and (c) A photo of upper part of the burner; (d): Swirler vans.

Conclusion

Dans ce chapitre notre but était de mieux connaitre les dernières innovations concernant les bruleurs a swirl et les différents paramètres qui influence sur la flamme tel que la géométrie le nombre de swirl et l'impact de l'ajoute d'hydrogène sur l'environnement.

CHAPITRE II

L IMPACT DE L'AJOUTE D'HYDROGENE DANS LE METHANE

II.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre on va le consacre sur l'impact de l'ajout d'hydrogène au méthane dans un bruleur surtout sur l'intérêt de l'ajout d'hydrogène et l'impact de l'hydrogène sur les émissions polluantes et sur la recirculation des produits de combustion et sur la température et Limites d'inflammabilité et mécanisme d'extinction : interaction chimie/turbulence et Influence de l'ajout d'hydrogène sur la structure et la position des zones de réaction et Influence de l'ajout d'hydrogène sur les températures et les concentrations des fumées. Après tous sa on va déduire les avantages et les inconvénients de l'ajoute d'hydrogène dans un bruleur.

II.2 Définition de l'hydrogène et du méthane :

II.2.1 Définition d'hydrogène :

C'est élément le plus léger dans l'univers et premier élément dans le tableau périodique, l'hydrogène est aussi le plus abondant, constituant les étoiles comme les nuages moléculaires. Il compose aussi l'une des molécules vitales pour la vie : l'eau.

II.2.2 Définition du méthane :

Le méthane est présent à l'état naturel sur la Terre. La formule chimique de cet hydrocarbure de la famille des alcanes se note CH4 (un atome de carbone et quatre atomes d'hydrogène). Découvert en 1776 par Alessandro Volta, le méthane se trouve dans des régions naturelles peu ou pas oxygénées, comme les marais. Il est produit par les organismes vivants (végétaux, animaux…) sous l'effet de la fermentation ou de la digestion. Incolore et inodore, le méthane constitue 90% du gaz naturel, qui est la troisième ressource énergétique mondiale utilisée après le pétrole et le charbon. Le méthane est le seul hydrocarbure qui puisse être obtenu par un procédé naturel. Il représente un risque pour l'environnement, car le méthane est l'un des principaux gaz à effet de serre.

II.3 Intérêt de l'ajout d'hydrogène :

La démarche d'enrichissement d'un pré-mélange de méthane/air en hydrogène s'inscrit dans une volonté de réduction des polluants. Les normes anti-pollution étant de plus en plus sévères, les industriels spécialisés dans la conversion d'énergie (moteur à combustion interne, turbines à gaz terrestres ou aéroportées) doivent en permanence améliorer leurs produits pour diminuer leurs émissions polluantes. [19]

Une stratégie intéressante pour parvenir à une réduction des polluants est la combustion en mélange pauvre. La température de combustion est réduite et l'on diminue ainsi les émissions de NOx

(production des NO thermiques). Cependant, lorsque l'on s'approche des limites d'inflammabilité, la stabilité de la flamme est menacée et des phénomènes d'extinction peuvent apparaître, augmentant les émissions d'hydrocarbures imbrûlés. La stabilité de la flamme est un paramètre primordial en combustion, qu'il est impératif de maîtriser dans des configurations industrielles. De nombreuses études ont alors démontré que l'ajout d'hydrogène au mélange permet de solutionner ce problème. En effet, l'adjonction de petites quantités d'hydrogène à un mélange CH4/Air permet d'étendre les limites d'inflammabilité du mélange et d'accroître la stabilité de la combustion.

II.3.1 Moteur à combustion interne :

De nombreuses études ont investigué l'impact de l'ajout d'hydrogène dans les moteurs à Combustion interne fonctionnant au gaz naturel. Elles ont permis de montrer que l'ajout d'hydrogène augmente la stabilité de la flamme, De plus, si l'on se place à une richesse donnée, le remplacement d'un volume de gaz naturel par de l'hydrogène diminue les émissions d'hydrocarbonés, de CO et de CO2, en augmentant très légèrement les émissions de NOx. Lorsque l'on diminue la richesse, on diminue fortement les émissions de NOx, tout en augmentant les émissions d'hydrocarbonés, de CO et de CO2. La solution d'ajouter de l'hydrogène pour ensuite diminuer la richesse n'est donc pas parfaite mais a le mérite de diminuer fortement les émissions de NOx et d'offrir un meilleur compromis NOx/ Imbrûlés/CO. La possibilité de fonctionner avec des mélanges pauvres est très intéressante dans une optique de recirculation des gaz d'échappement (EGR). En effet, l'ajout d'hydrogène permet d'augmenter les proportions d'EGR (acceptées par le moteur au gaz naturel). L'augmentation de la quantité de gaz d'échappement admise dans le mélange permet de réduire fortement les émissions de NOx avec une faible augmentation des émissions des hydrocarbonés imbrûlés. Smith et Bartley travaillent avec de l'hydrogène de synthèse (issu d'une catalyse des gaz brûlés). L'ajout de cet hydrogène augmente la tolérance en EGR de 44 % et diminue de 77 %les émissions de NOx. De plus, la durée de la combustion et le délai d'auto inflammation sont réduits. Tsolakis et Megaritis utilisent également cette technique pour diminuer les émissions polluantes et la consommation de carburant. L'ajout d'hydrogène peut se révéler intéressant pour les moteurs HCCI (Homogènes Charge Compression Ignition) fonctionnant au gaz naturel. En effet, le gaz naturel à une température d'auto inflammation assez élevée. Il est donc nécessaire d'augmenter le taux de compression et de chauffer les gaz frais pour enflammer le mélange. L'ajout d'hydrogène couplé à la recirculation de gaz d'échappement permettrait de diminuer la température d'auto inflammation. L'ajout d'hydrogène avance en effet le début de la combustion dans le cylindre. [20]

II.3.2 Combustion pré mélangée sur des configurations de type « brûleurs » :

Les avantages tirés de l'hydrogène intéressent également fortement l'industrie des turbines à gaz. Des études fondamentales sur des brûleurs ont été mises en place pour caractériser l'impact de l'ajout d'hydrogène. La flamme reste stable pour des températures et des richesses plus faibles, ce qui permet de diminuer la production des émissions de NOx. Des études ont été réalisées sur une flamme pauvre prémélangée stabilisée par un swirl. La combustion a lieu à pression atmosphérique à l'intérieur d'une chambre en quartz refroidie par air. Le prémélange CH4/Air est enrichi en hydrogène jusqu'à 20 % en volume. Les résultats ont montré que l'addition d'une faible quantité d'hydrogène au prémélange CH4/Air permet une réduction des émissions de CO sans pour autant augmenter les émissions de NOx. La stabilité de la flamme est largement augmentée, ce qui est dû à une plus forte concentration des radicaux OH (mesures obtenues par fluorescence plan induite par laser). De plus, l'ajout d'hydrogène implique une diminution de la taille de la flamme. Des études numériques ont également montré que l'ajout d'hydrogène augmente largement la résistance à l'étirement de la flamme et la limite basse de stabilité.

Après ce tour d'horizon des travaux effectués sur l'importance de l'ajout de l'hydrogène, nous présentons une étude complète sur le mélange hydrogène/méthane. [21]

II.3.3 Etude des mélanges méthane - hydrogène

L'utilisation d'hydrogène comme combustible est intéressante pour plusieurs raisons. Tout d'abord, le seul produit de combustion de l'hydrogène est l'eau. Son utilisation permet donc d'éliminer l'émission de dioxyde de carbone à l'endroit où se situe l'installation de combustion. De plus, il sera alors possible d'utiliser des combustibles qui contiennent une grande quantité d'hydrogène dans le but de produire de l'énergie et de la chaleur tout en produisant peu d'émissions polluantes, en ayant une grande efficacité thermique et un processus peu couteux. [5]

L'hydrogène est un composé nettement plus réactif que le méthane. En effet, la vitesse de flamme laminaire de l'hydrogène dans l'air est 6 fois plus grande que la vitesse de flamme laminaire du méthane. Et la masse volumique de l'hydrogène est très faible (0.0899kg/m3 à 0°C, contre 0.717kg/m3 pour le CH4, Tableau 1).

Tableau II. 1 Propriétés chimiques du méthane et de l'hydrogène (source Association Française de l'Hydrogène).

	Gaz naturel (méthane CH_4)	Hydrogène (H_2)
Masse molaire (g/mol)	16	12
Masse volumique (conditions atmosphériques) (en kg/m3)	0.7	0 .08
Chaleur de combustion (inférieure) (en kJ/g)	50	120
Limite du domaine d'inflammabilité dans l'air (en %vol)	5.3-15.0	4.0-75.0
Energieminimale d'inflammation (en MJ, pour mélange stœchiométrique à pression et température ambiante)	0.29	0.02
Températured'auto-inflammation (en °C)	540	585
Température de flamme (en °C)	1875	2045
Limite de détonabilité (en %vol)	6.3-13.5	13-65
Energie explosive (en kg TNT/m3)	7.03	2.02
Coefficient de diffusion dans l'air (en cm^2/s)	0.16	0.61
Vitesse de flamme dans l'air (cm/s)	37	260
Vitesse de détonation dans l'air (km/s)	1.8	2

II.3.4 Impact de l'ajout d'hydrogène sur les émissions de NOx :

Dans cette partie, nous nous attacherons à étudier l'impact sur les émissions en oxyde d'azote de la Substitution d'une partie du méthane par de l'hydrogène.

Pour un mélange hydrogéné donné, l'augmentation de la température de préchauffage de l'air conduit à une augmentation de la production de NOx. Cette tendance est illustrée grâce aux mesures

réalisées sur l'installation de combustion diluée de Politecnico di Milano et résumées par la Figure 1.

Cette installation permet de reproduire le régime de combustion sans flamme en brûlant du combustible avec de l'air chaud initialement dilué par une grande quantité d'inertes. La quantité d'inertes est contrôlée de manière à faire varier le taux de dilution. La Figure 1 représente les émissions de NOx en fonction du taux de dilution pour différentes températures de préchauffage de l'air, pour les mélanges CH4/H2 70/30% (figure a) et 40/60% (figure b) en volume. De même, pour une composition du mélange combustible et une température de préchauffage de l'air données, les émissions de NOx diminuent lorsque le taux de dilution augmente. Ces deux tendances sont similaires à celles observées pour la combustion sans flamme au méthane. De plus, la figure (b) met aussi en évidence que les températures de préchauffage faibles réduisent le taux d'oxydation du combustible et augmentent le temps caractéristique de combustion. De ce fait, les combustibles hautement réactifs, tel que l'hydrogène, peuvent avoir le même comportement que le méthane : produire de très faibles émissions de NO et obtenir une combustion diluée stable à différents taux de recirculation.

Il faut cependant noter que plus le mélange contient de l'hydrogène, plus le taux de recirculation doit être élevé pour atteindre des émissions de NOx peu importantes. En effet, il devient plus difficile de déplacer le front de flamme dans la chambre de combustion afin d'éviter les pics de température et donc la formation de NO. [8]

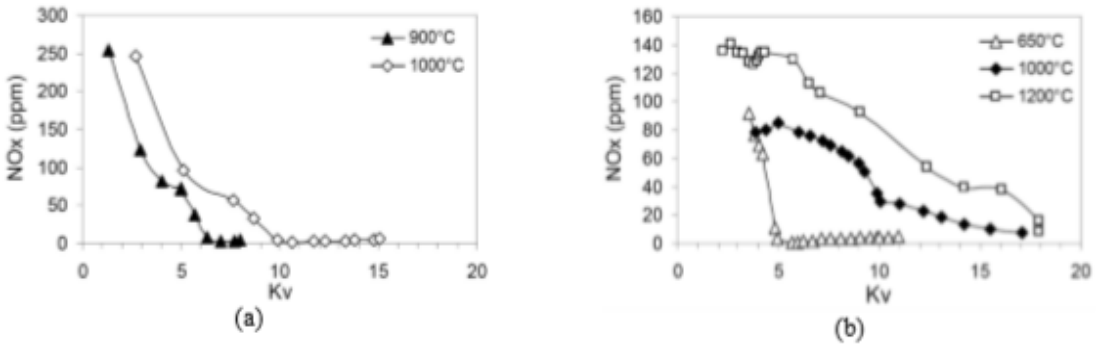

Figure II. 1 les émissions de NOx en fonction d'hydrogène

L'évolution des émissions de NOx en fonction du pourcentage d'hydrogène dans le mélange est résumée Figure 2. Il est évident que lorsque la quantité d'hydrogène du combustible augmente, les émissions de NOx croissent. Cependant, il est important de noter que selon le type d'installation, l'influence de la quantité d'hydrogène ne semble pas être la même. En effet, sur l'installation d'ENEL, qui ne permet pas des taux de dilution important puisque seule une faible partie des gaz brûlés est réinjectée juste en sortie du brûleur2, l'ajout d'hydrogène à hauteur de 10% provoque déjà un accroissement significatif des émissions de NOx. Tandis que dans le cas de l'installation de GASUNIE

(2005, avec un brûleur JDDC150, coflow d'air et de combustible à forte vitesse), four industriel pour lequel le grand volume de la chambre de combustion permet des recirculations naturelles, l'ajout d'hydrogène, jusqu'à 55% en volume ne modifie pas les émissions de NOx. Pour des concentrations H2 supérieures à 55% et inférieures à 75% (aucune mesure n'a été réalisée avec des concentrations de H2 supérieures à 75%), l'augmentation des émissions de NOx est principalement due, à la présence d'une petite zone de combustion de type flamme de diffusion en sortie de brûleur. Cette zone de réaction favorise les pics de température et donc la production de NOx par voie thermique. [11]

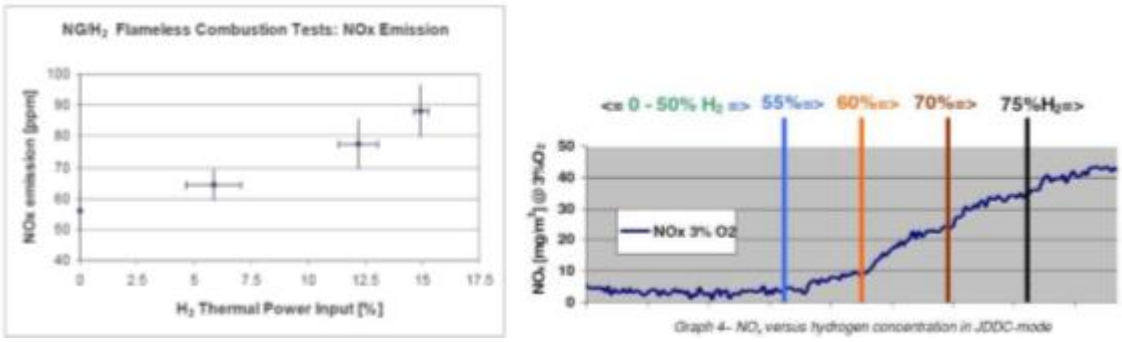

Figure II. 2 réalisées sur mesures l'installation de combustion sans flamme

Pour le cas avec du méthane pur, la contribution principale est apportée par la voie de formation thermique, qui représente plus de 90% des émissions totales. Pour le cas avec de l'hydrogène pur, les émissions de NOx sont constituées exclusivement par la voie thermique par l'absence de composé carboné. Dans ce cas, les émissions de NOx sont supérieures à 100ppm si le taux de recirculation est maintenu en dessous de 100%. Cependant, les émissions de NOx diminuent rapidement sous 100ppm lorsque le taux de recirculation devient supérieur à 2. En augmentant le taux de recirculation, la dilution du mélange avant réaction augmente, ce qui permet de limiter la formation de points chauds et donc la formation de NOx par voie thermique.

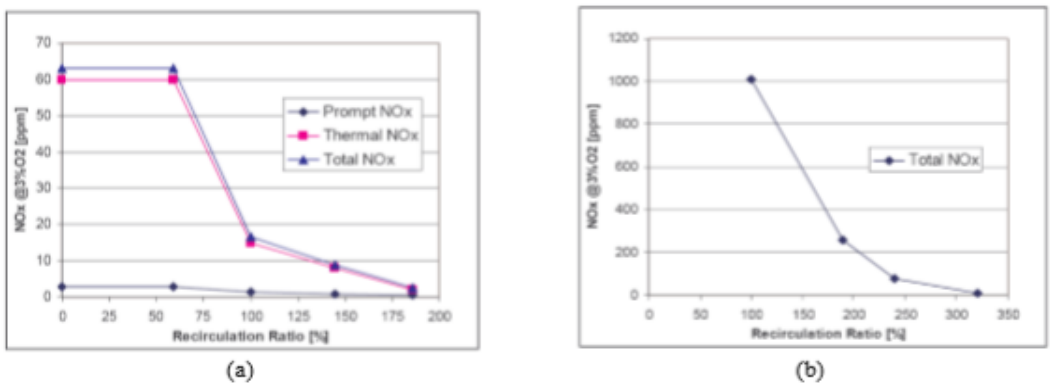

Figure II. 3 Emissions de NOx en combustion sans flamme (a) méthane pur (b) hydrogène pur

II.3.5 Impact de l'ajout d'hydrogène sur la recirculation des produits de combustion et sur la température du four :

Dans le cas d'installations fonctionnant au méthane pour lesquelles la recirculation est faible ou est forcée, l'ajout d'hydrogène oblige une augmentation importante du taux de recirculation pour atteindre un seuil faible d'émissions de NOx. Ce seuil est dominé par la réactivité du mélange. Derudi et Villani ont observé plusieurs effets positifs sur la stabilité de la combustion sans flamme. La Figure 4 représente les domaines d'existence de la combustion sans flamme (température de four et taux de dilution) en fonction de la nature du combustible. Grâce à l'ajout d'hydrogène, la température d'auto-inflammation est plus basse, la gamme d'inflammabilité est plus importante et la combustion a tendance à produire une plus grande quantité de radicaux H, ce qui autorise la combustion sans flamme à s'étendre vers des environnements très dilués et à des températures moyennes de four plus faibles. [3]

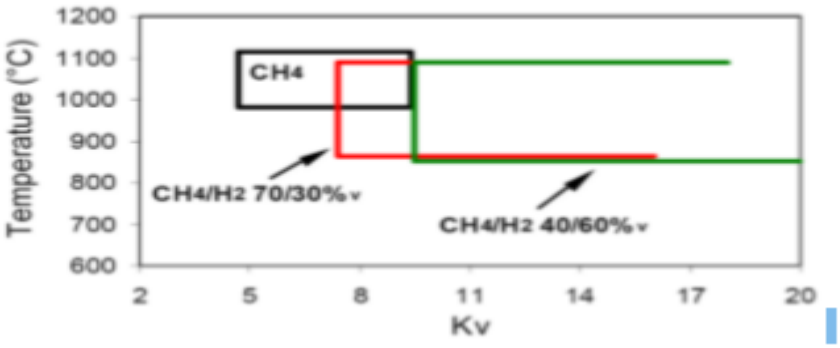

Figure II. 4 « Clean mild combustion » pour le méthane pur, et deux mélanges méthane/hydrogène.

Les auteurs observent qu'en dessous du seuil de température défini par la région d'existence de la combustion sans flamme, l'efficacité de la combustion diminue ce qui provoque une production importante de CO avec une diminution importante du CO2. La forte réactivité du mélange combustible, lorsque de l'hydrogène est présent, permet d'atteindre le régime de combustion sans flamme même pour des environnements très dilués. Ceci laisse aussisupposer que l'hydrogène pourrait être utilisé pour doper des carburants à faible pouvoir calorifique dans le but d'obtenir une combustion plus efficace, favorisant l'oxydation complète des hydrocarbonés. L'hydrogène pourrait être utilisé même dans des écoulements très dilués et prévenir ainsi la formation de polluants et principalement les hydrocarbonés imbrûlés et les suies.

Les résultats de Derudi et al. Sont confirmés par Galletti et al., qui ont simulé numériquement l'installation de combustion diluée de Politecnico di Milano (Figure 5). Lorsque del'hydrogène est ajouté au méthane, un taux de recirculation plus grand est nécessaire pour atteindre le régime de

combustion sans flamme, puisqu'il est possible d'observer, que la zone à haute température est plus grande lorsque le combustible est un mélange méthane – hydrogène, pour un même taux de dilution (figure c).

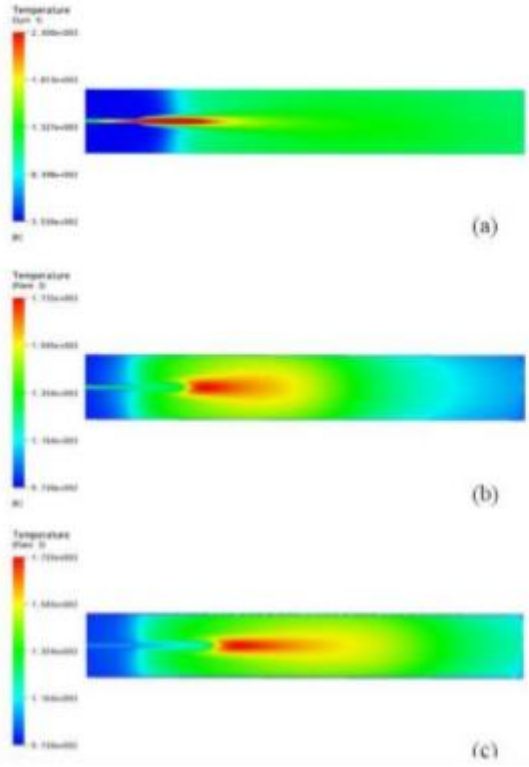

Figure II. 5Champs de température pour (a) le méthane en combustion classique et (b) sans flamme et (c) un mélange

De même, les résultats des simulations obtenus dans le cas d'un brûleur autorégénératif de 13kW fonctionnant en régime de combustion sans flamme (ENEL) lorsqu'il est alimenté par du méthane permettent d'arriver à la même conclusion (Figure 25). Sur la Figure 6, le champ de température (a) est calculé pour du méthane pur. Dans ce cas, la température est homogène au sein de la chambre de combustion. Lorsque l'on ajoute de l'hydrogène, la température maximale augmente et la zone de flamme devient visible. La recirculation des gaz brûlés n'est plus suffisante pour assurer les conditions nécessaires pour atteindre le régime de combustion sans flamme lorsque l‟on ajoute de l'hydrogène au méthane. Pour le champ de température (c), le brûleur fonctionne avec un degré de recirculation de 102%. Les émissions de NOx prédites s'élèvent à 64ppmv, les performances du brûleur pourraient être améliorées en augmentant le taux de recirculation. Dans leur configuration, ceci pourrait être réalisé endiminuant la section d'injection de l'air, ce qui permettrait d'augmenter la vitesse de l‟air et donc d'augmenterl'entrainement des produits de combustion. En effet, en diminuant la section de moitié, le taux de recirculation augmente jusqu'à 143% et les émissions de NOx décroissent à 13ppmv.

Figure II. 6Distribution de température pour différentes compositions du carburant :(a) 0% H2; (b) 4.8% H2; (c) 11.2 % H2

Dans le cas où la géométrie du brûleur ne permet pas des recirculations importantes, l'ajout d'hydrogène peut nécessiter un changement de géométrie du brûleur pour atteindre le régime de combustion sans flamme puisque des taux de recirculation plus importants sont nécessaires pour avoir une combustion propre lorsque l'hydrogène est ajouté au combustible .En revanche, dans le cas de fours industriels pour lesquels les dimensions de la chambre de combustion sont grandes par rapport au diamètre du brûleur, les recirculations sont suffisamment importantes pour atteindre le régime de combustion sans flamme sans, à priori, changement de géométrie du four (mesures IFRF avec le gaz de cokerie, Adolfi-2005, et mesures GASUNIE, Slim-2005). [22]

II.4 Limites d'inflammabilité et mécanisme d'extinction : interaction chimie/turbulence :

Un ajout d'hydrogène au méthane augmente les performances du brûleur en diminuant la température en dessous de laquelle la combustion n'est plus propre et en augmentant le taux de recirculation maximum. Si l'on compare avec le méthane, les combustibles hybrides contenant de l'hydrogène nécessitent une plus importante dilution en oxygène et une plus grande vitesse déjectionpour obtenir un régime de combustion stable. Mais ils permettent de faire fonctionner le brûleur à des températures de four plus faibles. En utilisant de l'H2 pur, il est possible d'atteindre le régime de « combustion diluée propre » à des températures beaucoup plus faibles que celles obtenues pour les mélanges. Un régime de combustion diluée « froid » a été observé pour des températures de four proche de 500°C avec un préchauffage de l'air à 200°C. Il a aussi été mis en évidence une limite haute de température d'environ 1100°C quel que soit le combustible, au-dessus de laquelle les

émissions de NOx deviennent importantes.

II.4.1 Influence de l'ajout d'hydrogène sur la structure et la position des zones de réaction :

La Figure 8 présente les images moyennes de chimiluminescence obtenues pour le préchauffage de l'air T=565 °C et le taux d'aération =1.18, en fonction du pourcentage volumique d'hydrogène dans le combustible. A partir de ces images moyennes, il est possible d'évaluer le niveau du signal d'émission des zones de réaction et des parois. Leurs évolutions, sont tracées sur le graphique Figure 7. L'ajout d'hydrogène provoque une modification du rayonnement des parois et donc du signal de fond sur l'imagerie moyenne de chimiluminescence, c'est pourquoi ce rayonnement moyen est soustrait à l'évolution du signal des zones de réaction principale et secondaire. L'intensité de la zone de réaction principale augmente de manière très importante dès qu'on ajoute 10% d'hydrogène dans le combustible. En effet, l'intensité moyenne dans la zone de réaction principale est triplée dès l'ajout de seulement 10% d'hydrogène. Ensuite à partir de 30% d"H2 elle diminue, elle est probablement liftée vers le haut du fait des fortes vitesses (à 40% d"H2, la vitesse du jet de combustible atteint 60m/s).

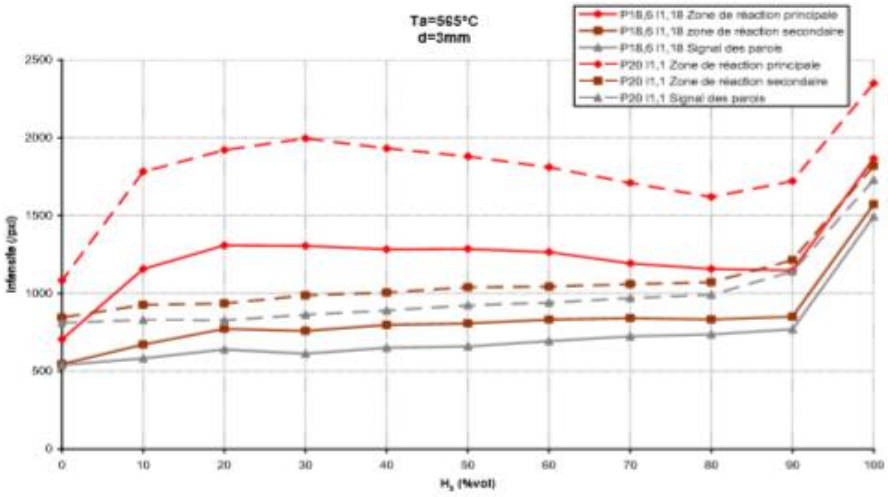

Figure II. 7 Evolution de l'intensité des zones de réaction et du signal des parois en fonction du pourcentage d'hydrogène dans le mélange combustible

En revanche, la zone de réaction secondaire (entre les jets de combustible et l'oxygène présent dans les gaz recirculant) devient nettement discernable dès l'ajout de 10% d"H2 et son intensité croit avec le pourcentage d'hydrogène: la réactivité du mélange combustible est augmentée par l'ajout d'hydrogène, en effet, l'hydrogène est un composé nettement plus réactif que le méthane (la vitesse de flamme laminaire de l'hydrogène dans l'air est 6 fois plus grande que la vitesse de flamme laminaire du méthane, cf. I.3-). A 10% d'H2, il est possible d'observer une extinction locale de la zone de réaction secondaire en sortie de brûleur probablement du fait d'un fort étirement entre le jet de combustible à grande vitesse et les gaz brûlés environnant à vitesse quasi nulle. Cette extinction locale disparaît pour

10% d'H2 : malgré l'augmentation de la vitesse du jet de combustible (+7m/s), le mélange est suffisamment réactif pour empêcher l'extinction locale de la flamme par étirement.[13]

Finalement, en fonctionnement à l'hydrogène pur, le rayonnement des parois est très intense, et l'intensité des zones de réaction continue à augmenter. La zone de réaction principale est décalée vers le haut par les fortes vitesses d'injection qui contrebalancent la plus forte réactivité du mélange à forte concentration en hydrogène. Cependant, la combustion obtenue présente les mêmes caractéristiques globales que la combustion sans flamme au méthane pur et le régime de combustion reste très dilué. [9]

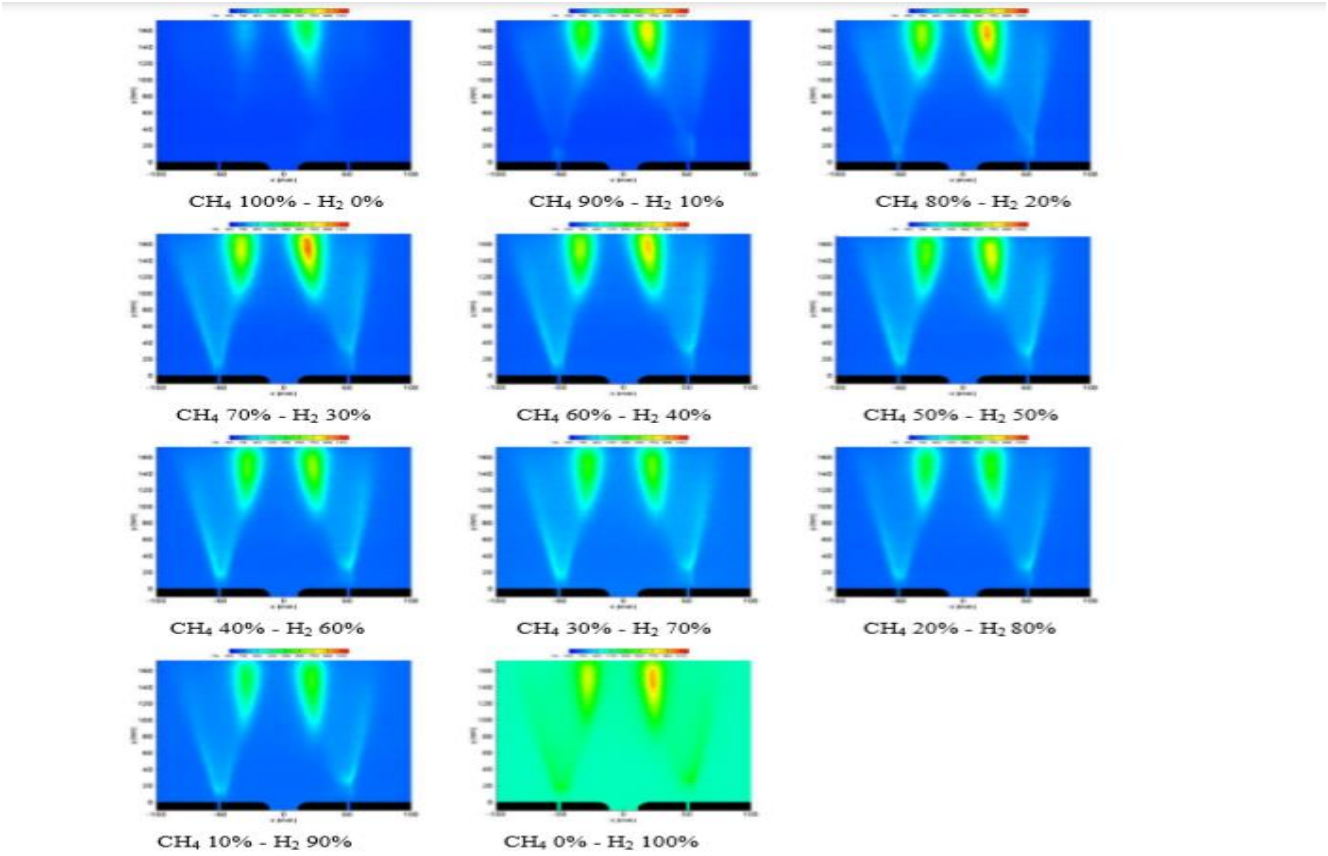

Figure II. 8P=18.6kW Ta=565°C, diamètre injecteur de combustible =3mm

II.4.2 Influence de l'ajout d'hydrogène sur les températures et les concentrations des fumées :

L'évolution de la température des fumées en fonction du pourcentage d'hydrogène dans le mélange combustible est représentée Figure 9. La température des fumées augmente en fonction du pourcentage d'H2. Ces fumées, lorsqu'elles recirculent, viennent chauffer les parois du FOUR. C'est pourquoi, la température des parois augmente avec le pourcentage d'hydrogène. De même, le signal des parois s'intensifie lorsque le pourcentage d'H2 croit : leur rayonnement dans le visible étant proportionnel à la température du réfractaire. La variation de température des parois (T=50-55°C) est la même que la

variation de température des fumées.

La Figure 10 résume les concentrations en NOx, O2 et CO2 mesurées dans les fumées en fonction du pourcentage volumique d'hydrogène dans le combustible. Sur la même figure, les concentrations théoriques dans les fumées, pour une combustion complète, sont représentées en tirets. La concentration en O2 mesurée augmente avec le pourcentage d'hydrogène.

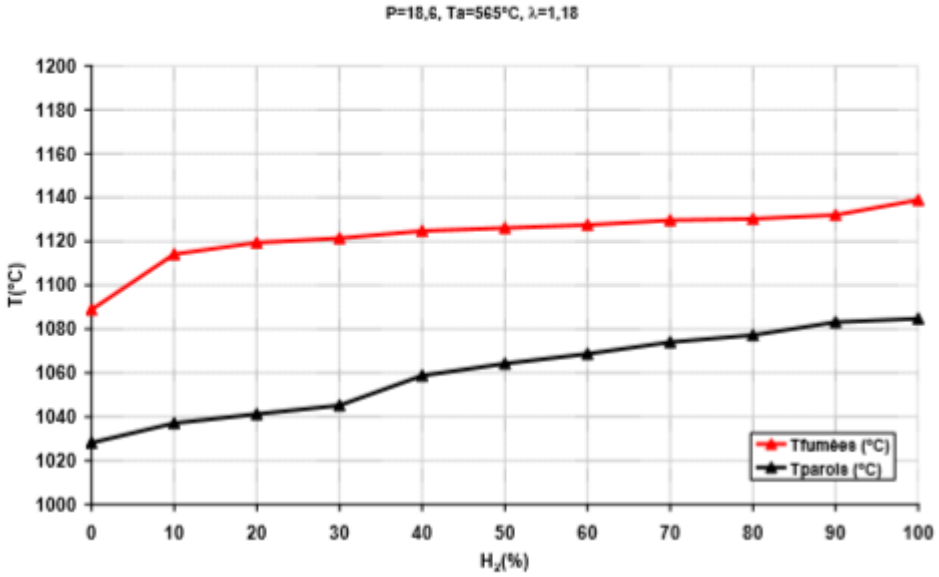

Figure II. 9Température des parois et des fumées.

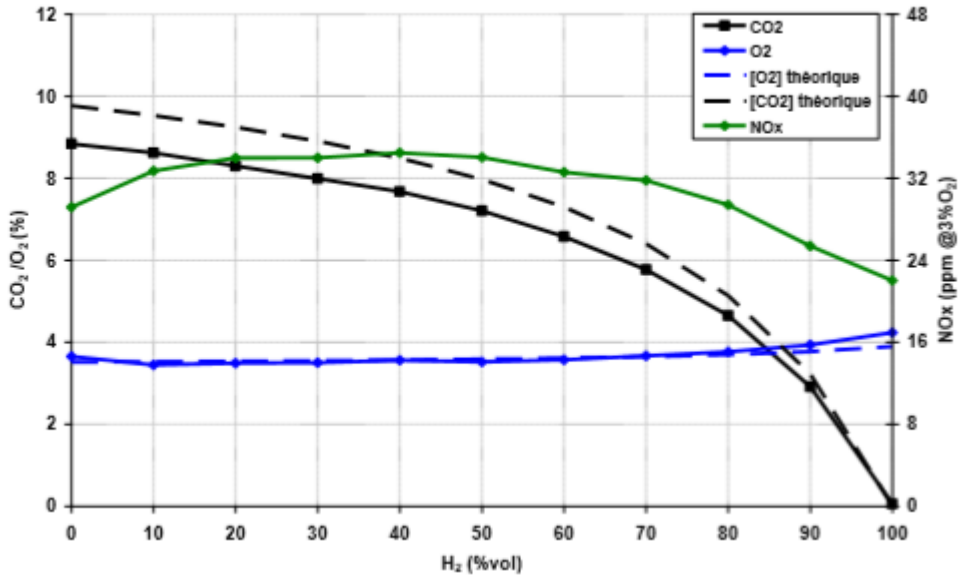

Figure II. 10Concentration des fumées.

La concentration en CO2 dans les fumées diminue lorsque l'on augmente le pourcentage d'hydrogène. En effet, en augmentant le pourcentage d'hydrogène, on diminue celui de méthane, donc le combustible contient moins d'atome de carbone, la réaction de combustion produit moins de CO2 (cf. I.3-). On observe une différence entre les valeurs mesurées et les valeurs théoriques. Cet écart a été retrouvé en dépit de plusieurs séries de mesures, et de la vérification de l'étalonnage de l'analyseur. Il semble dû à un dysfonctionnement de l'analyseur de CO2. La concentration en NOx augmente légèrement jusqu'à 40%, puis diminue jusqu'à 100%. On retrouve les mêmes évolutions que celles mises en évidence par imagerie de chimiluminescence. D'abord, une augmentation intense des zones de réaction qui laissent supposer une augmentation du NO thermique. Ensuite, après 40%, les zones de réaction se déplacent plus en aval : le régime de combustion est de plus en plus dilué. Les émissions de NOx diminuent légèrement malgré la plus forte réactivité du mélange à forte teneur en H2. Même si le PCI diminue lorsque H2 augmente, le débit et la réactivité du combustible sont suffisamment importants pour provoquer une augmentation de la température des fumées (et donc une augmentation de la température dans les zones de combustion). Cependant, la combustion est suffisamment diluée pour éviter la création de point très chaud et donc la formation d'oxydes d'azote. En effet, lorsque le combustible contient de l'hydrogène, la vitesse de flamme laminaire augmente (Ilbas-2006, Huang-2006) : la combustion est plus stable (la vitesse de flamme laminaire et les limites d'inflammabilité augmentent (Wierzba,2000)). La dilution par le CO2 (présent dans les gaz brûlés qui recirculent) diminue la vitesse de flamme laminaire (Natarajan-2007), ce qui permet de contrebalancer l'effet de l'ajout d'hydrogène tant que le brûleur ne fonctionne pas à l'hydrogène pur. [15]

La Figure 11 et la Figure 12 représentent respectivement l'évolution du volume des fumées (sèches et humides) et l'évolution du taux de recirculation des gaz brûlés dans le FOUR en fonction du pourcentage d'hydrogène dans le combustible.

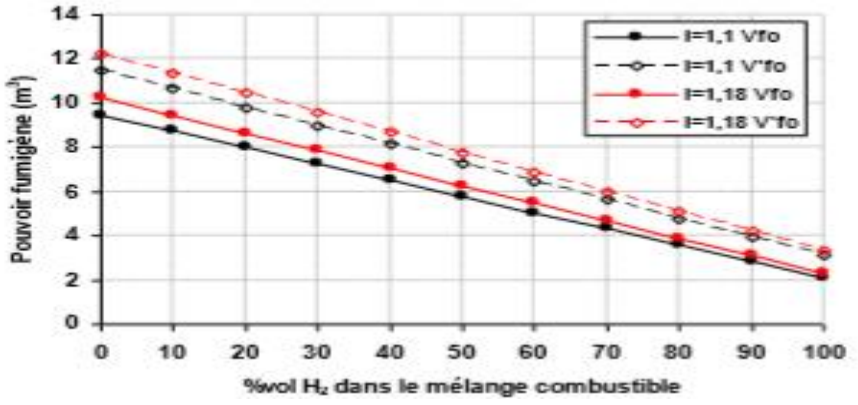

Figure II. 11Pouvoir fumigène : volume des fumées sèches et humides.

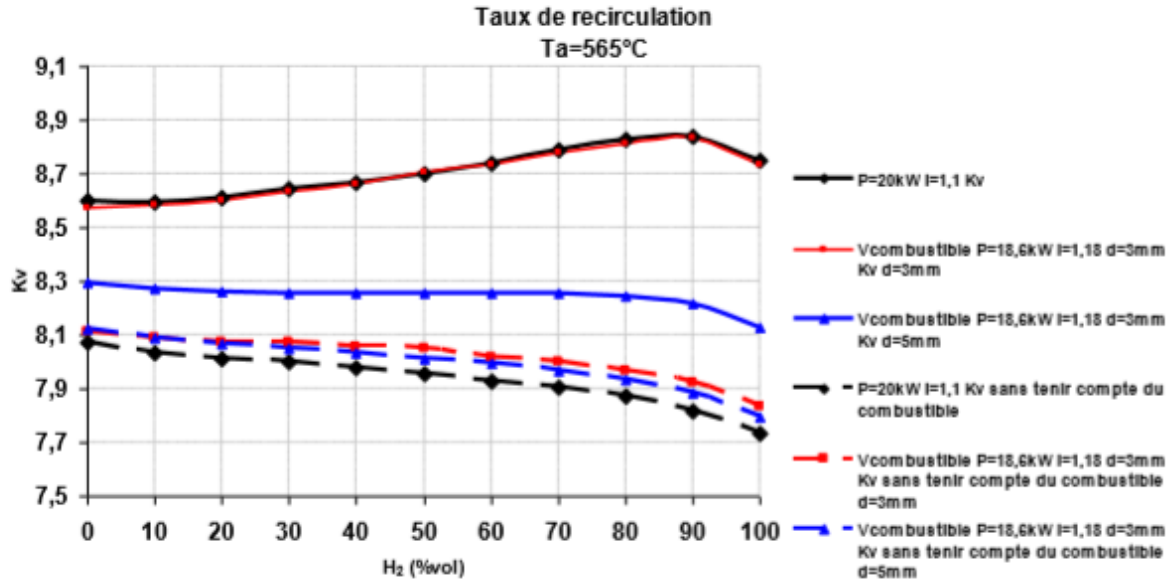

Figure II. 12Evolution du taux de recirculation dans le four en fonction du pourcentage volumique d'hydrogène dans le mélange combustible

La combustion à l'hydrogène produit plus d'eau que la combustion au méthane pur (le volume d'eau produit par la combustion d'1m3 de méthane est de 12.24 m3 représentant 16.3% du volume des fumées, tandis que le volume d'eau produit par la combustion d1m3 d'hydrogène est 3.31m3, ce qui représente 30.2% du volume des fumées, cf. annexe 4), cependant, le volume des fumées, qu'il soit calculé à partir des fumées sèches ou humides, décroit lorsque le pourcentage d'hydrogène augmente. La diminution du volume de fumées permet de réduire les pertes de chaleur puisque pour une puissance constante, le volume à chauffer est moindre. La température des parois augmente, ce qui laisse supposer que la combustion dans le FOUR s'intensifie, elle dégage plus de chaleur : la température locale augmente donc en fonction du pourcentage d'hydrogène dans le combustible. L'ajout d'hydrogène réduit l'énergie rayonnée par la zone de réaction. En effet, l'augmentation du volume d'hydrogène réduit la formation de CO2. L'augmentation du volume d'eau dans les fumées, et donc l'augmentation de l'énergie rayonnée due à cette espèce n'est pas suffisante pour contrebalancer la diminution du rayonnement due à la diminution du CO2 (Choudhuri, 2003). La température locale augmente donc non seulement du fait de la forte énergie spécifique de l'hydrogène mais aussi à cause de la réduction des pertes par rayonnement (Parente, 2008) et de la réduction des pertes de chaleur dans les fumées.

Le taux de recirculation (Figure 12) est plutôt stable (compris entre 8.6 et 8.9) même s'il présente une légère augmentation due à l'augmentation de l'impulsion des jets de combustibles. L'impulsion du jet d'air décroit lorsque le pourcentage d'H2 dans le mélange augmente puisque le débit d'air diminue, de même l'impulsion des fumées diminue parce que leur volume et leur masse volumique diminuent.

En revanche, l'impulsion des jets de combustibles augmentent puisque leur vitesse est multipliée par trois lors du fonctionnement à l'hydrogène pur. Finalement, les diminutions des impulsions des jets d'air et des fumées sont contrebalancées par l'augmentation de l'impulsion du jet de combustible (qui ne peut pas être considérée comme négligeable): le taux de recirculation varie donc peu en fonction du pourcentage d'hydrogène dans le mélange combustible.[7]

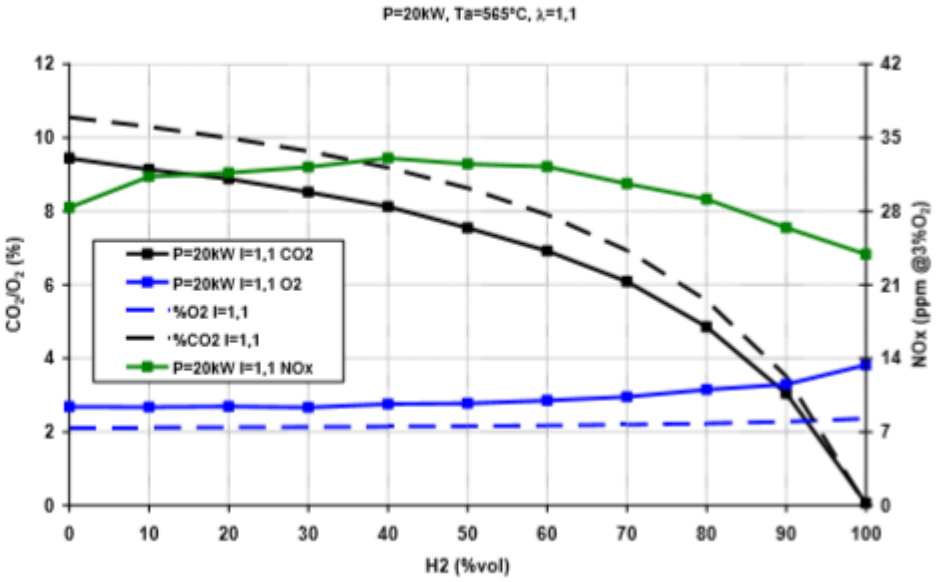

Figure II. 13Concentrations des fumées

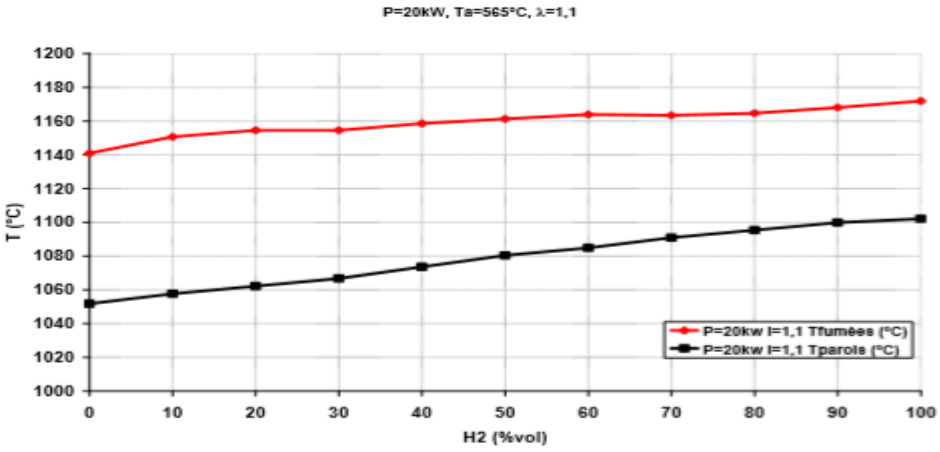

Figure II. 14Température des parois et des fumées.

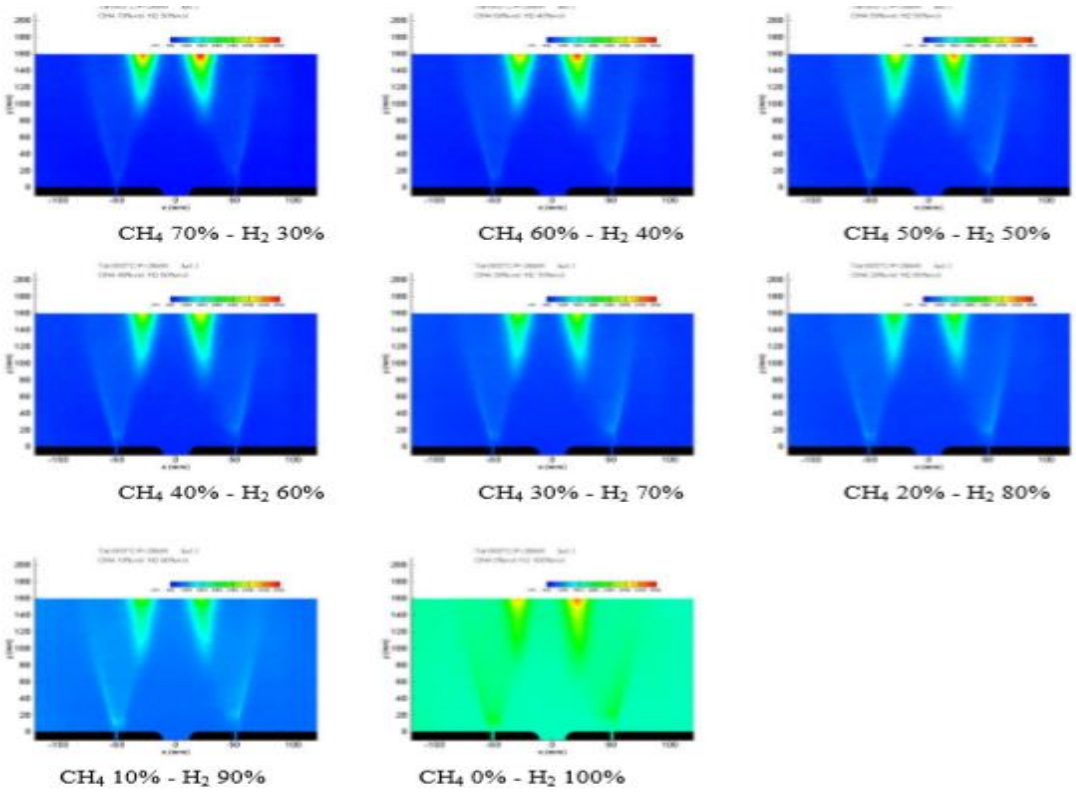

Figure II. 15P=20kW, d=3mm

II.4.3 Influence de l'hydrogène sur la concentration des fumées :

La Figure 16 représente l'évolution des concentrations en CO2 et NOx dans les fumées en fonction du pourcentage volumique d'hydrogène dans le combustible. Le pourcentage de CO2 émis diminue avec le pourcentage d'hydrogène. En effet, la quantité de méthane disponible pour produire du CO2 diminue. La concentration des NOx croit de 5ppm (pour le méthane pur) à 14ppm (pour 50% d'hydrogène dans le combustible), puis elle diminue jusqu'à 6ppm pour le cas à l'hydrogène pur. L'augmentation de la concentration en NOx pour les mélanges contenant jusqu'à 60% d'hydrogène semble être liée à la structure des zones de réaction. En effet, l'imagerie de chimiluminescence (Figure 14) met en évidence une zone de réaction principale qui augmente en intensité (en valeur globale, ce qui est représenté par la courbe noire et aussi en valeur maximale, directement représenté en rouge sur la cartographie) jusqu'à 60% d'hydrogène. Puisque la zone de réaction se rapproche du brûleur, la dilution des jets avant combustion est moins importante, localement la température est élevée ce qui provoque cette légère augmentation des NOx.

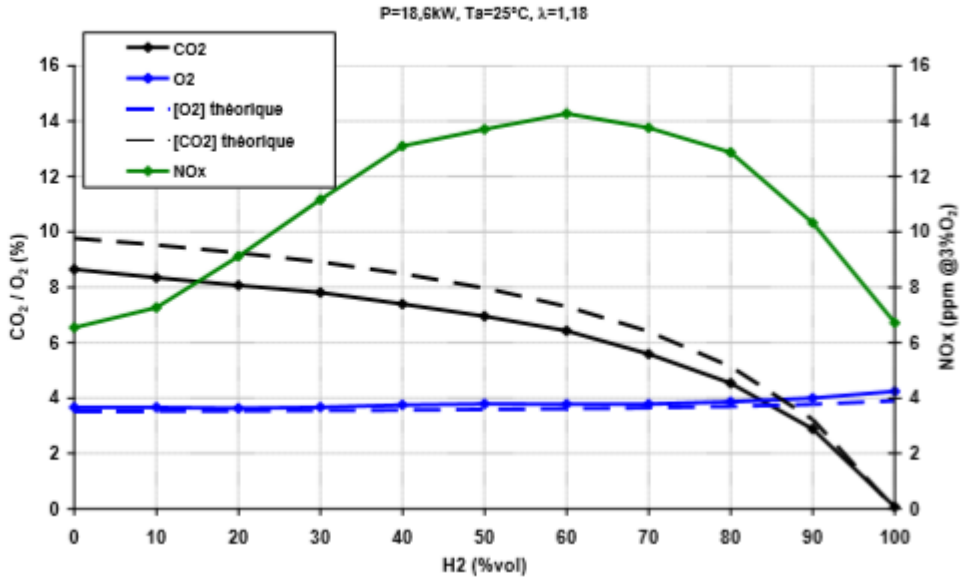

Figure II. 16Concentration des fumées, P=18.6kW, Ta=25°C, d=3mm.

Pour le brûleur de l'installation pilote du CORIA fonctionnant avec des mélange CH4/H2 en régime de combustion sans flamme, avec un taux d'aération1.18 et sans préchauffage de l'air, la production de NOx reste inférieure à 15ppm. Les émissions de NOx, très faibles et bien en dessous des installations « classiques » de combustion, montrent que le régime de combustion obtenu, quel que soit le pourcentage d'hydrogène dans le combustible, reste un régime de combustion dilué qui ne présente pas de pic important de température, tout comme pour le cas avec préchauffage de l'air.

Lorsque l'on atteint 100% d'hydrogène, on n'observe plus d'émission de CO, de CO2 et peu de NOx, il n'y a pas non plus d'imbrulés. La combustion sans flamme à l'hydrogène pur, et en l'absence de préchauffage de l'air n'permet plus de polluant.

La Figure 12 présente le taux de recirculation du FOUR en régime de combustion sans flamme, en fonction du pourcentage volumique d'hydrogène dans le combustible. Le taux de recirculation dans le four varie peu, il se situe toujours proche de 5.5 (même s'il a tendance à augmenter) quel que soit le pourcentage d'hydrogène dans le combustible. Derudi et al ont montré qu'un taux de dilution plus important était nécessaire pour atteindre le régime de combustion sans flamme lorsque de l'hydrogène était ajouté au combustible. Cette limite est de KV min=7 pour CH4 70%-H2 30% et de Kvmin=9 pour CH4 60% - H2 40%. Parente et al sont arrivés à la même conclusion : une modification des brûleurs existant est nécessaire afin de pouvoir atteindre le régime de combustion sans flamme. Dans notre étude, la géométrie du brûleur n'a pas été modifiée, le taux de recirculation croit peu, et le régime de combustion sans flamme peut quand même être atteint. Cependant, notre installation est géométriquement plus proche d'une installation industrielle que le brûleur de laboratoire de Milan : les

parois sont éloignées du brûleur, et l'augmentation de l'impulsion des jets de combustible permet d'augmenter légèrement le taux de recirculation. [8]

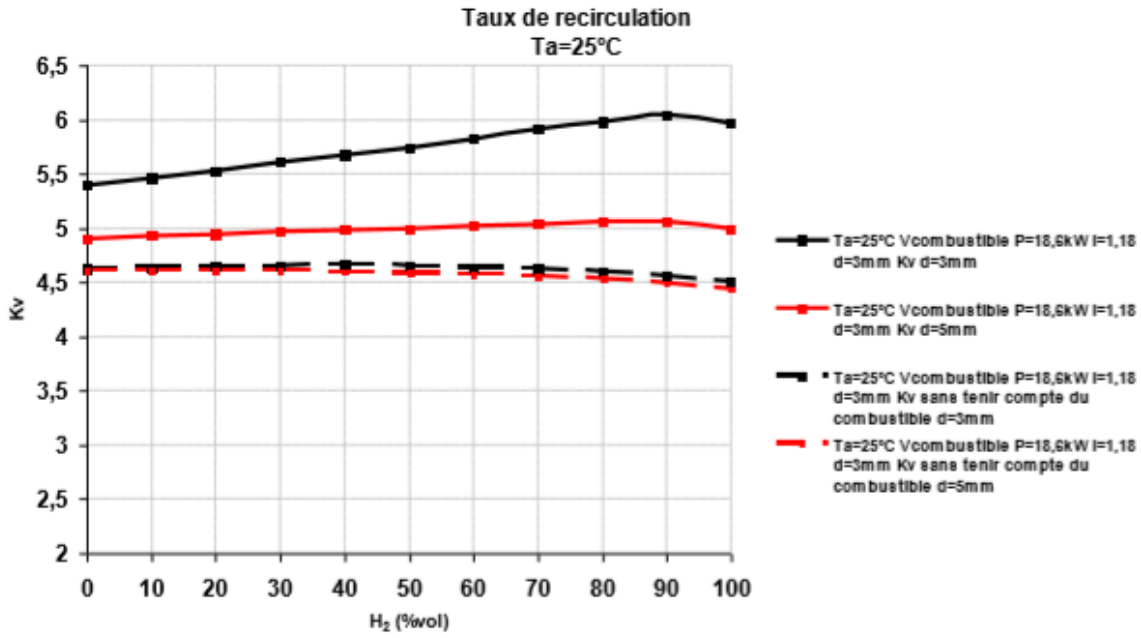

Figure II. 17Evolution du taux de recirculation dans le four en fonction du pourcentage volumique d'hydrogène dans le mélange combustible.

II.4.4 Influence du diamètre d'injection du combustible :

Lorsque le four fonctionne avec de l'hydrogène pur, la vitesse du combustible est de 140m/s. Ces fortes vitesses sont susceptibles de provoquer une déstabilisation de la combustion. Afin de diminuer la vitesse déjection, des essais ont été effectués avec une nouvelle série d'injecteurs de diamètre 5mm. Dans cette configuration, avec de l'hydrogène pur, la vitesse des jets de combustible est de 47m/s, vitesse se rapprochant de la vitesse des jets de méthane pur. Pour le cas au méthane pur, la structure des zones de réaction ne change pas : deux zones de réaction autour des jets de combustible et après le point de fusion des jets, pour le cas avec préchauffage de l'air, et pas de zone de combustion décelable proche du brûleur pour le cas sans préchauffage de l'air. En revanche, la concentration des fumées est modifiée par le changement d'injecteur. On observe des émissions de NOx plus importantes, et dans le cas avec préchauffage de l'air, il est possible d'observer quelques flammes de manière intermittente. Lorsque le pourcentage d'hydrogène augmente, pour le cas avec préchauffage de l'air, l'intensité dans la zone de réaction principale diminue jusqu'à 80% d'hydrogène. Pour 100% d'hydrogène, l'augmentation de la réactivité du combustible provoque une zone de réaction plus intense au point de fusion. L'intensité dans la zone de réaction secondaire augmente avec le pourcentage d'hydrogène. Pour le cas sans préchauffage de l'air, dès 10% d'hydrogène on observe l'apparition des deux zones de réaction pour lesquelles l'intensité ne cesse d'augmenter avec le pourcentage d'hydrogène. Que ce soit

avec ou sans préchauffage de l'air, les concentrations en cheminées présentent la même évolution (mais avec des valeurs plus importantes) que pour les injecteurs de 3mm. De même on retrouve l'écart inexpliqué entre les concentrations mesurées en O2 et CO2 et les concentrations théoriques, alors que la combustion est complète car aucune émission de CO n'est mesurée. En conclusion, l'augmentation du diamètre des injecteurs n'apporte pas de gain en termes de stabilisation et est plutôt défavorable au mélange puisque la vitesse et le taux de turbulence des jets de combustibles diminuent, le taux d'entrainement des jets diminue lui aussi et donc de ce fait, la dilution des jets par les gaz brûlés recirculant. La combustion est donc moins diluée, et plus d'oxydes d'azote sont produits.

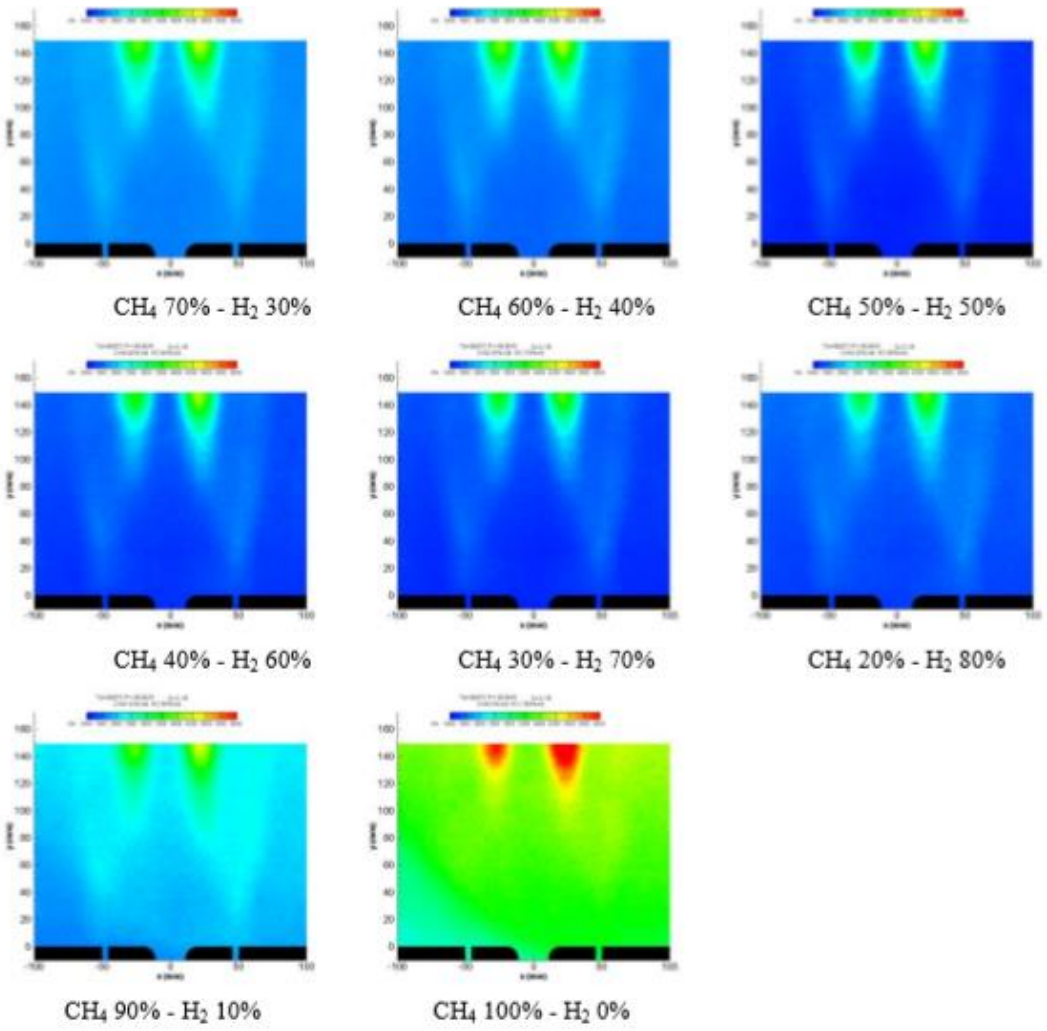

Figure II. 18Images moyennes de chimiluminescence OH*, cas avec préchauffage de l'air.

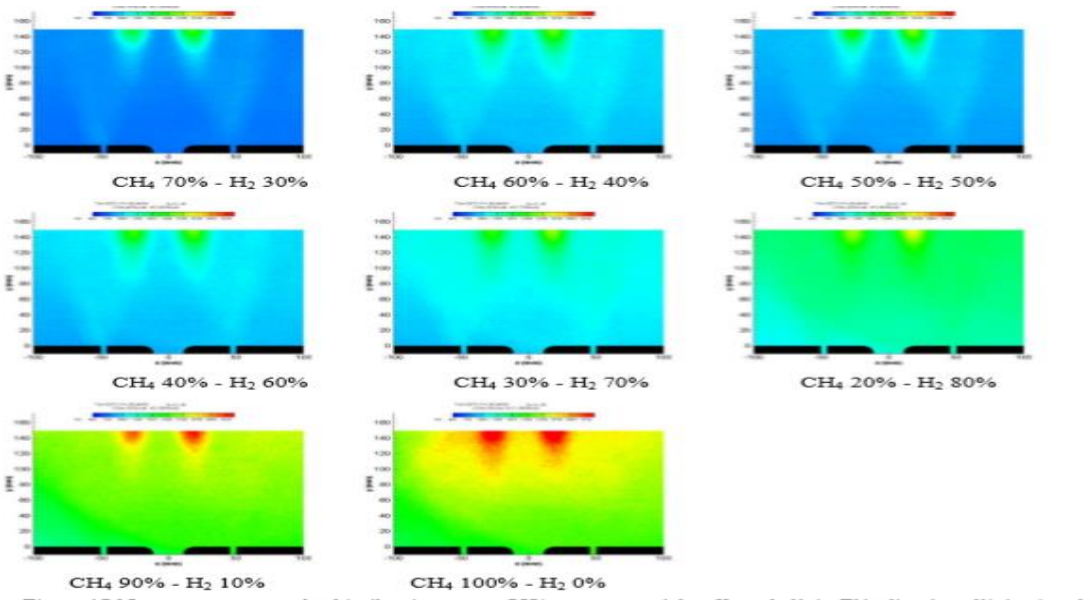

Figure II. 19Images moyennes de chimiluminescence OH*, cas sans préchauffage de l'air.

On va déduire les avantages et les inconvénients de l'ajout hydrogène au méthane après avoir fait le chapitre 1 et 2.

- **Les avantages de l'ajout de l'hydrogène au méthane :**

- Il réduit considérablement les émissions polluantes
- Il diminue aussi la température.
- L'adjonction de petite quantité d'hydrogène au mélange permet d'étendre les limites d'inflammabilité du mélange.
- Il augmente la stabilité de la flamme.
- La flamme reste stable pour des températures et des richesses plus faibles.
- Les richesses faibles permettent une réduction des émissions de Co sans pour autant augmente les émissions de NOx
- Il implique une diminution de la taille de la flamme
- Il augmente les performances du bruleur en diminuant la température.
- Il est renouvelable.

- **Les inconvénients de l'ajout de l'hydrogène au méthane :**

- Lorsque on diminue la richesse, on réduit fortement les émissions de NOx. Tout en augmentant les émissions d'hydrocarbonés.
- L'augmentation de la température de préchauffe de l'air conduit à une augmentation de la production de NOx.
- L'ajout de l'hydrogène rend plus difficile de placer le front de flamme dans la chambre de combustion afin d'éviter les pics de température et donc la formation de No.
- L'influence de la quantité d'hydrogène varie selon le type d'installation.
- L'intensité moyenne dans la zone de réaction principale est triplée dès l'ajout de seulement 10% d'hydrogène.
- La température des fumées augmente en fonction du pourcentage d'hydrogène.
- Il n'est pas facile de remplacer l'infrastructure existante.

CONCLUSION :

Il apparaît donc clair que l'hydrogène présente des avantages considérables. Il constitue en effet une énergie propre Cependant, si jusqu'à aujourd'hui il n'a pas connu un réel essor, c'est parce que de nombreux obstacles nuisent à son développement. Ces problèmes doivent être résolus pour que l'hydrogène puisse s'intégrer à la société actuelle. Parmi eux,la stabilité de la flamme et la quantité d'hydrogène.

CHAPITRE III

PROCEDEUR NUMERIQUE

III Procédure de résolution par FLUENT

III.1 Introduction

Dans cette section on propose la description et la simulation par le code FLUENT, essentiellement la procédure qu'il propose pour résoudre les problèmes tels que le nôtre. La construction des géométrique avec génération de maillage et l'incorporation des conditions aux limites sont effectuées par le préprocesseur ANSYS.

III.2 Le préprocesseur ANSYS

ANSYS est un logiciel de DAO (Dessin Assisté par Ordinateur) et de génération de maillage (Mailler). ANSYS est un logiciel qui permet de réaliser des géométries en 2D ou 3D et de construire le maillage. Largement répandus dans l'industrie (automobile, aéronautique, spatiale, …etc.) en raison de son interface graphique puissante, il permet aussi de réaliser tout type de géométries complexes (fixes ou mobiles) associées à des maillages fixes ou adaptatifs. Le choix du maillage est un point essentiel dans la précision et l'exactitude des résultats numériques. Pour ce faire, on doit déterminer les paramètres optimaux et choisir une stratégie de maillage qui répond à nos objectifs, Parmi ces paramètres, on peut citer :

- Le nombre de mailles.
- La distance entre les mailles (concentration des mailles).
- La forme de la maille.
- Les paramètres de déformation pour le cas du maillage déformable.

III.2.1 Géométrie du bruleur :

Pour cette étude, une structure à géométrie simple a été adopté ; 2D avec des maillages testés et optimisés, Et pour la simulation numérique bidimensionnelle La structure montrée sur la figure 1 a été utilisée. La géométrie est une moitié du domaine afin d'utiliser la symétrie avec swirl, les formes et dimensions sont montrées sur la Figure1. L'entrée d'air a été décalée vers l'arrière de 20 mm conformément à la structure expérimentale proposée par Nogenmyr K.J. et al (2009). Les dimensions testées ont montré que le volume est assez suffisant pour l'étude du problème. La géométrie ne comporte pas de parois solide, tout le domaine de calculs est ouvert à l'atmosphère (pression atmosphérique). Sa longueur (distance axiale) est de 300mm et sa hauteur (distance radiale) est de 150mm. Le bec du bruleur

a un rayon de 25mm, il se compose de deux parties ; la plaque perforée axiale où le mélange réactif est injectée avec une vitesse purement axiale d'un rayon de 15mm et d'un espace annulaire swirlé de 10 mm où le mélange réactif est injecté avec deux composantes de vitesses ; axiale et tangentielle.

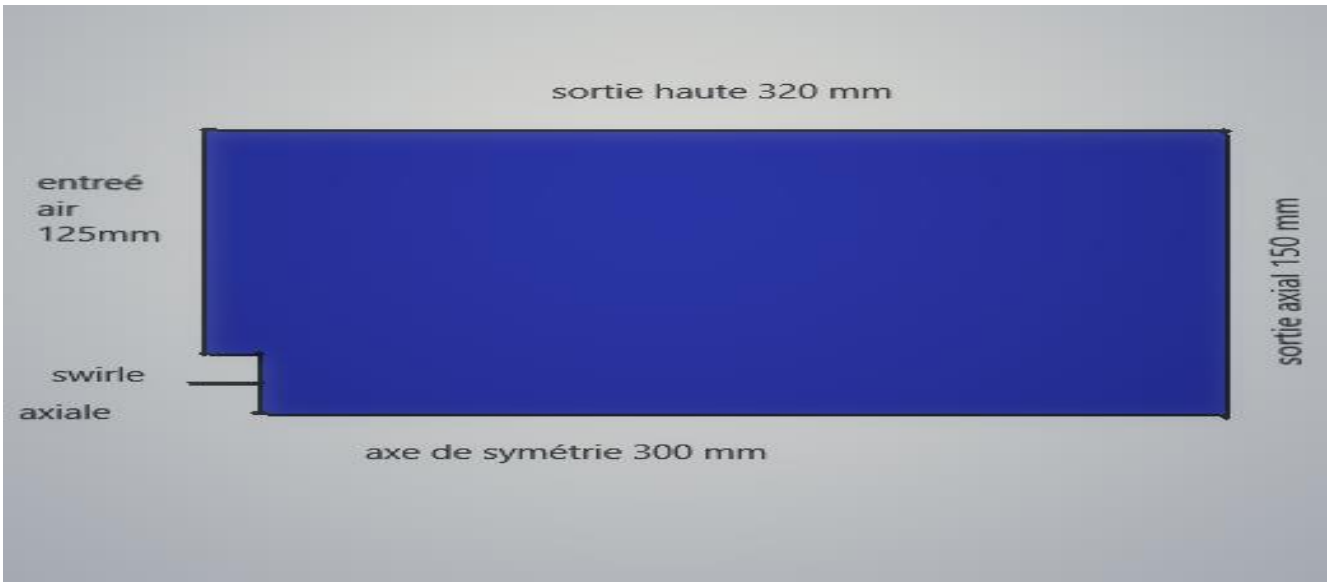

Figure III.1Structure du domaine de calcul

III.2.2 Structure et test de maillage :

Le maillage adopté (Figure 2) est structuré non uniforme, il a subi 2 adaptations avec l'option qu'offre le code de calcul commercial utilisé ANSYS fluent 17.2. Au cours de l'adaptation, chaque cellule carrée va se diviser en quatre sous cellules carrées avec des dimensions identiques, ce qui assure l'obtention d'une grille comportant des cellules structurées. L'adaptation a été effectuée sur les zones du domaine comportant des gradients importants de vitesses, températures ou autres variables régissantes sur les flammes. Le maillage adapté comporte18000 nœuds. Ce choix a été sélectionné après avoir effectué des tests d'indépendance de la grille par rapport à la solution.

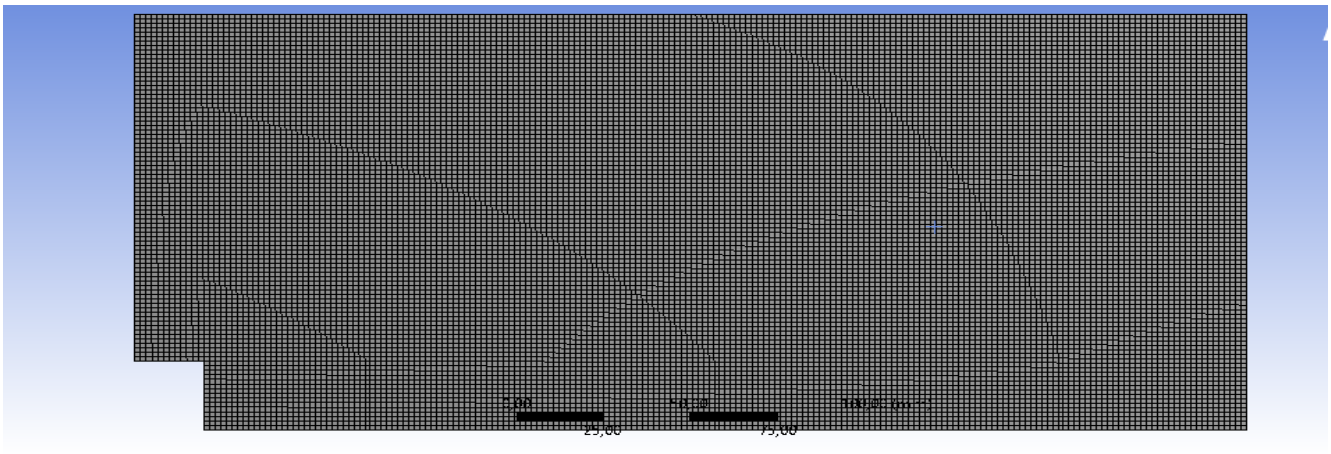

Figure III.2 Structure du maillage

Plusieurs cas de simulations numérique ont été testés pour les structures afin d'atteindre une solution indépendante de la grille. Pour notre cas, on a commencé avec 6646 nœuds puis, 9281,13697, 18000, 26535, 36044 et enfin 47350 nœuds. La température qui est prépondérant en combustion a été choisie comme variable de comparaison. La figure 3 montre que les profils de température sur l'axe du bruleur 2D sont influencés par le nombre de nœuds du maillage. L'indépendance est claire à partir de 18000 nœuds. Cette analyse a été réalisée sur des cas réactifs pour éviter les interactions des modèles utilisés sur le choix de la grille.

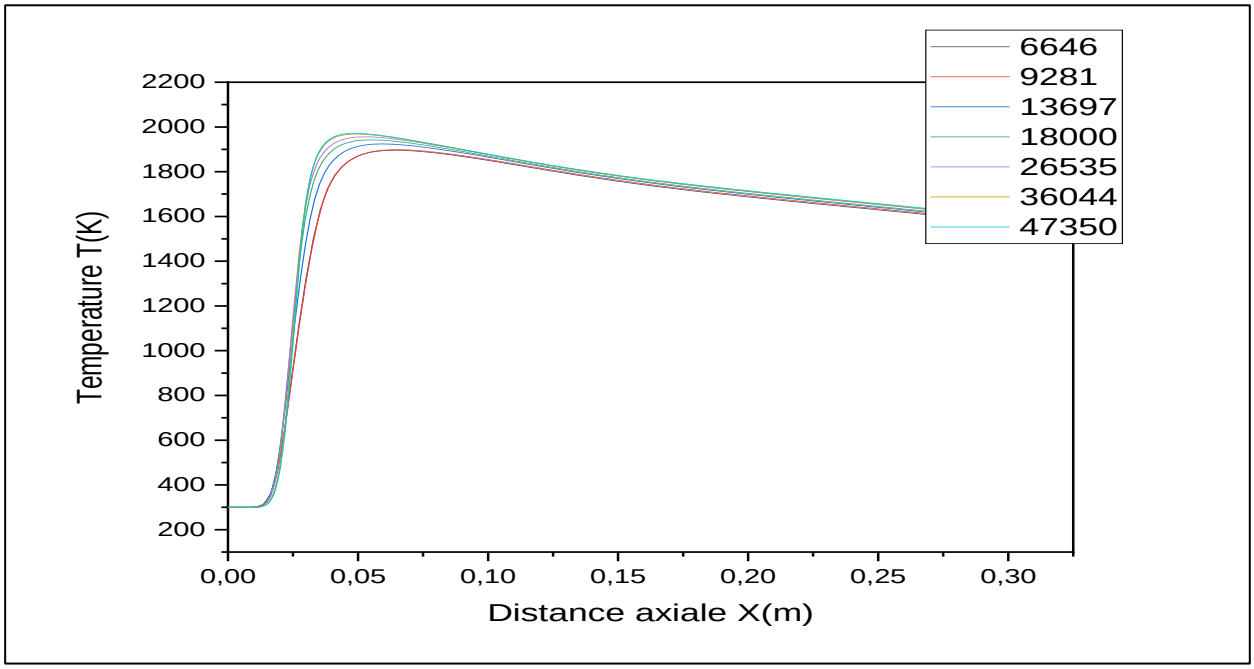

Figure III.3 Température sur l'axe du bruleur pour différents nombres de nœuds

III.2.3 Lancement du FLUENT :

Fluent est un logiciel de simulation de tous les écoulements de fluides, compressibles ou incompressibles, impliquant des phénomènes physiques complexes tels que la turbulence, le transfert thermique, les réactions chimiques, les écoulements multiphasiques, la cavitation, les écoulements dans les moteurs thermiques et les machines tournantes, et ce, pour des géométries industrielles complexes.

Ce produit dispose d'un outil de graphisme pour l'affichage des résultats et leur exploitation. Le code de calcul FLUENT comprend :

- Le solveur : le menu est tel que opérations se font de gauche vers la droite.
- Importer et dimensionner le maillage.

- Sélectionner le modèle physique.
- Définir les propriétés des matériaux.
- Définir les conditions de calcul.
- Définir les conditions aux limites.
- Fournir une solution initiale.
- Régler les paramètres du solveur.
- Régler le moniteur de convergence.
- Lancer le calcul et surveiller la solution.

III.2.4 Définir les conditions aux limites et opérateurs :

Dans cette partie on va définir les paramètres utilisés lors de la simulation numérique ainsi que les conditions aux limites imposées. Pour notre cas, seul l'effet de l'ajout d'hydrogéné a été effectué. Le tableau 1 résume les différents paramètres constants utilisés lors de notre simulation La pression opératoire, la température d'entrée et la vitesse initiales ont été prise de l'étude expérimentale proposée par Nogenmyr K.J. et al (2009). Le choix des valeurs des nombres adimensionnels utilisés (Nombre de Schmidt turbulent, Nombre de Prandtl Pr et le Nombre de Prandtl Pr) repose sur les résultats obtenus lors de la validation. [22]

Tableau III. 1Conditions opératoires 1

Paramètre	désignation
Modèle de combustion	EDM - Partially Premixed
Modèle de turbulence	RANS k-ε standard
Solveur	Axisymétrique swirl Pressure-Based Absolute

Température d'entrée	300 k
Flamme speed model	zimont
Operating pressure	1 ATM
Reynolds Re	11400
Nombre de Schmidt turbulent	0.5
Nombre de Prandtl Pr	0.5
Nombre de Schmidt de la PDF	0.85
Vitesse d'entrée moyenne	~5m/s
Vitesse de flamme de turbulence constante	0.52
Wall dumpings coefficient	1
Stretch factor coefficient	1
Multi phase	off

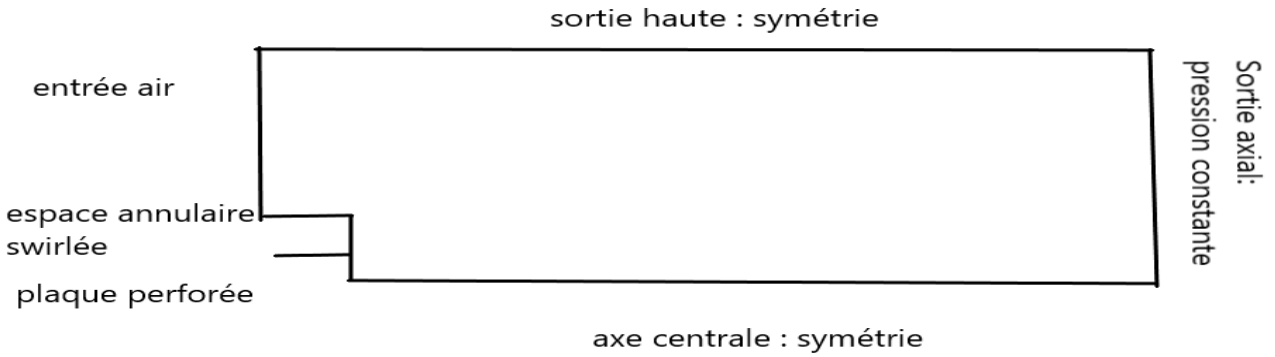

Figure III.4 Conditions aux limite

Pour notre simulation numérique cinq conditions aux limites ont été pose sur notre configuration :

Entrée d'air : sur cette section d'un rayon de 125mm décalée de 20 mm en amont du bec bruleur, une vitesse d'air purement axiale a été imposée Les différents paramètres posés sont montrés sur le tableau2.

Tableau III. 2 Conditions aux limites à l'entrée d'air

Section	Vax (m/s)	Vs (m/s)	I (%)	Dh (mm)	Fraction massique de l'O2	Fraction massique du N2
Entré d'air	0.3	0	0.1	125	0.23	0.77

La sortie axiale : sur cette section, il est supposé que l'écoulement axiale soit établi.

Sortie latérale et haute : cette zone délimite les domaines de calcul sur la distance radiale.

Plaque perforée axiale : cette partie est positionnée sur la zone axiale du bec bruleur avec un rayon de 15 mm Le tableau 3 montrent les différents paramètres imposés sur cette section.

Tableau III. 3 Conditions aux limites sur la 1a plaque perforée

Section	Vax (m/s)	Vs (m/s)	I (%)	Dh (mm)	Fraction massique du CH4	Fraction massique du N2	Fraction massique de l'O2
Plaque perforée	1.725	0	12	30	0.0348	0.7452	0.22

L'espace annulaire swirlé : cette section est un espace annulaire de 10 mm de qui entoure la plaque perforée axiale le mélange réactif passe à travers cette section avec une vitesse tangentielle (swirl) et axiale. Les paramètres posés sont montrés sur le tableau 4 :

Tableau III. 4 Conditions aux limites sur l'espace annulaire swirlé.

Section	Vax (m/s)	Vs (m/s)	I (%)	Dh (mm)	Fraction massique du CH4	Fraction massique du N2	Fraction massique de l'O2
Annulaire swirlé	3.8	2.85	12	32	0.0348	0.7452	0.22

III.2.5 Equation du mélange hydrogéné méthane :

Dans notre cas, nous avons considéré le méthane avec une richesses 0.6 et plusieurs mélanges méthane-hydrogène contenant 0% jusqu'à 10% d'hydrogène à richesse globale constante 0.6. La richesse et la fraction molaire d'hydrogène ajoutée sont définies à partir de l'équation du bilan de la réaction de combustion suivante :

(1-α) CH4 +αH2+(2-1.5α +X) (O2+3.87N2) =>(1-α) C02 +(2-α) H2O +X (O2 + 3.78N2) +(2-1.5α) N2 [10]

La richesse du mélange est donnée par :

$$\phi = \frac{\frac{mcarb}{mair}}{\left(\frac{mcarb}{mair}\right)stoch} \text{ [10]}$$

Avec α est la fraction molaire de l'hydrogène ajoutée :

$$\alpha = \frac{nH2}{nH2+nCH4}$$

Où n est le nombre de moles.

L'excès d'air est donné par :

$$X = \frac{2-1.5\alpha}{\phi} \text{ -2+1.5α [10]}$$

Le tableau suivant montre les fractions molaires du CH4 et N2 et O2 et H2 par rapport au pourcentage d'hydrogène dans le mélange .

Tableau III. 5 Les fractions molaires du ch4 et du N2 et O2 et du H2 par rapport au différent pourcentage d'hydrogène.

Hydrogéné %	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%	9%	10%
Fraction molaire du CH4	0.03360	0.03343	0.03338	0.03324	0.03320	0.03315	0.03309	0.03301	0.03290	0.03274
Fraction molaire du N2	0.74203	0.74205	0.74208	0.74219	0.7421	0.7422	0.7418	0.7412	0.7417	0.07342
Fraction molaire de l'O2	0.22434	0.2243	0.22431	0.2243	0.2243	0.2243	0.2243	0.2244	0.2244	0.2244
Fraction molaire du H2	4.28.10-5	8.55.10-5	1.29.10-4	1.73.10-4	2.20.10-4	2.65.10-4	3.11.10-4	3.55.10-4	4.07.10.-4	4.55.10-4

III.3 Conclusion :

Ce chapitre résume les moyens numériques exploités lors de cette étude. Le problème a été décrit, la géométrie et les maillages adoptés ont été étudiés pour la configurations et conditions aux limites et opératoires posées sont citées et justifiées.

Le chapitre suivant (4) sera consacré aux résultats et discussions des résultats numériques obtenus.

CHAPITRE IV

RESULTATS ET DISCUSIONS

IV.1 Introduction :

Dans ce chapitre seront présentés les résultats des simulations numériques élaborées ; l'effet de l'ajout d'hydrogène (H2) pour des flammes de méthane-air prémélangées turbulente swirlées. Les modèles utilisés sont comparés et validés avec des résultats numériques (simulation aux grandes échelles LES) et expérimentaux des travaux de Nogenmyr K.J. et al (2009). Les paramètres tel que la température, la vitesse axiale, la distribution du CH4, l'apparition des NOx thermiques et la création du CO seront analysés en détail

IV.1.1 L'influence de l'ajout d'hydrogène :

L'étude de l'influence de la richesse s'est effectuée sur les configurations, le pourcentage a été variée de 1%à 10% avec un pas de 0.2 afin d'étudier le comportement des flammes dans le domaine pauvre. Les points pertinents qui ont été pris en considération sont : la position de la flamme, et l'apparition des NOx et CO et CO2.

IV.1.2 Paramètres du problème :

Un écoulement réactif de méthane-hydrogène est considéré dans cette étude. Le mélange entre dans une section appelée le bec bruleur d'un diamètre de 50 mm qui est constitué de deux parties ; une plaque perforée axiale d'un diamètre de 15 mm où l'écoulement réactif est purement axial, et d'un espace annulaire de 10 mm où l'écoulement a deux composantes de vitesses, la première axiale et la seconde tangentielle qui est représentative du taux de swirl. L'espace entourant le bec bruleur est appelé l'entrée d'air où uniquement de l'air est injectée en co-courant à 20 mm en amont avec une faible intensité de turbulence. La simulation numérique s'est effectuée pour un bruleur ouvert à la pression atmosphérique conformément à la structure du bruleur de LSB élaboré par Cheng R.K. (1995) et développé par ; Johnson M.R. et al (2005), Littlejohn D. et al (2010) et Nogenmyr K.J. et al (2009). Les résultats obtenus par Nogenmyr K.J. et al (2009) nous ont servis pour la comparaison et la validation de nos résultats.

IV.2 Validation :

La validation des modèles utilisés a été effectuée en comparant les résultats obtenus de la simulation numérique actuelle (RANS) avec les résultats expérimentaux et simulation numérique LES obtenus par Nogenmyr K.J. et al (2009). Les profils de températures, de vitesses axiales et de la distribution du CH4 ont été comparés pour les cas 2D dans le but d'illustrer les capacités performances des modèles adoptées (RANS k-ε Standard, EDM et Partially-Premixed) pour l'étude des flammes issus d'un bruleur LSB.

IV.2.1 Validation des profils de températures :

Le profil de température a été considéré pour La configuration. Il est montré sur l'axe du bruleur X. Le profil de température obtenus (Figure IV.1) montre une augmentation brusque de la température qui est l'une des caractéristiques de combustion. Les valeurs de températures obtenues sont comprises entre 300 K et 1720 K. On remarque une similitude claire entre la simulation RANS avec les résultats de Nogenmyr K.J. et al (2009). La position du front de flamme et le maximum de températures atteintes sont pratiquement identiques.

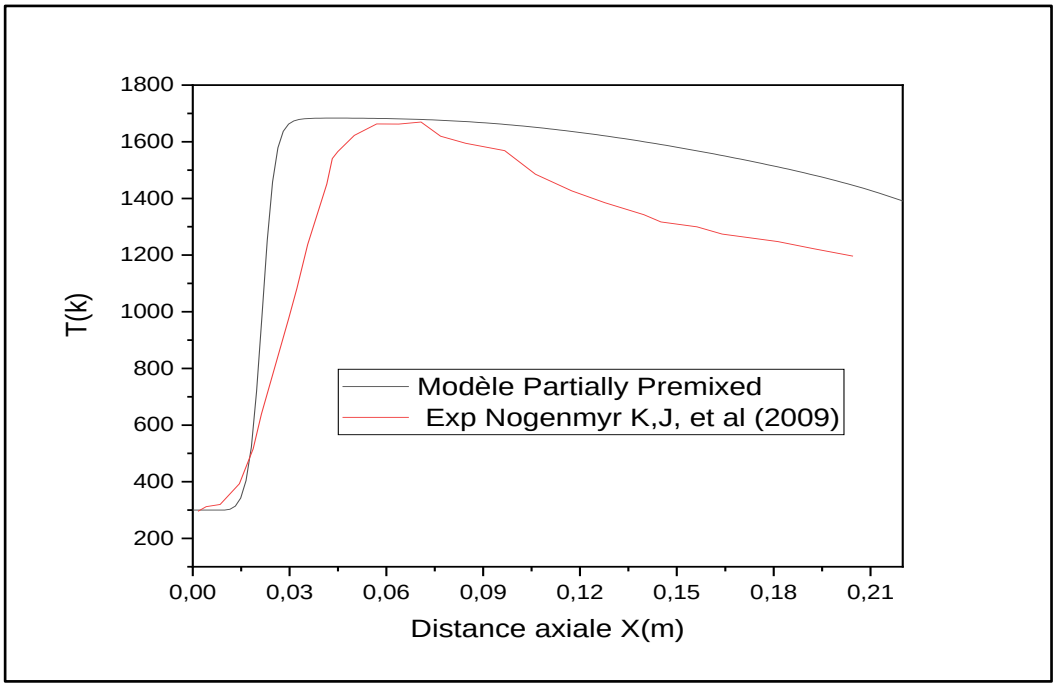

Figure IV.1 Validation des profils de température sur l'axe du bruleur

Dans notre cas on remarque flamme légèrement plus courte par rapport au cas de validation.

IV.2.2 Validation des profils de vitesses axiales :

La figure IV.2, montre les profils de vitesses axiales normalisés (Vax/Vo) en 2D sur des sections radiales du domaine de calcul. La comparaison des résultats obtenus par le modèle Partially-Premixed avec ceux de Nogenmyr K.J. et al (2009) montrent de bonnes similitudes. Pour les sections X/D=0.2, 0.4 et 0.6 les valeurs obtenues sont plus faibles que celles de l'expérience mais pour les sections restantes (X/D=0.8, 1.0, et 1.2), on remarque une légère surestimation des profils de vitesses axiales. Pour les sections X/D=0.8 et 1.0.

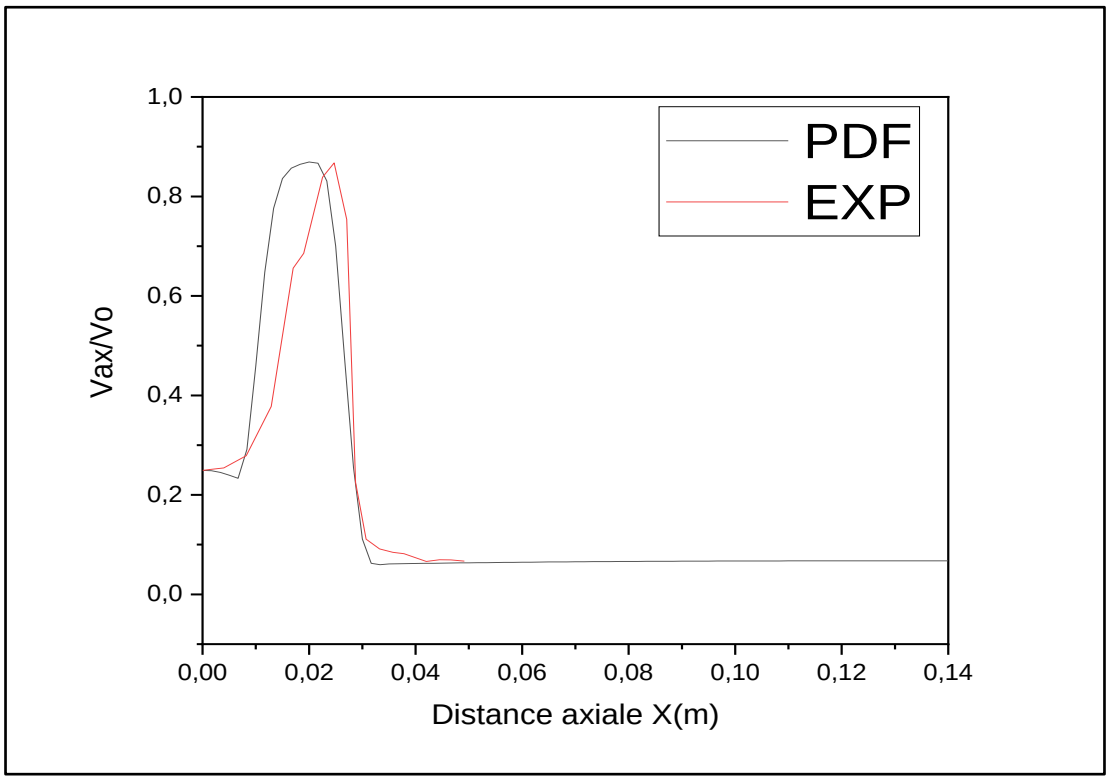

Figure IV.2 Validation des profils de vitesses axiales pour X/D=0.2.

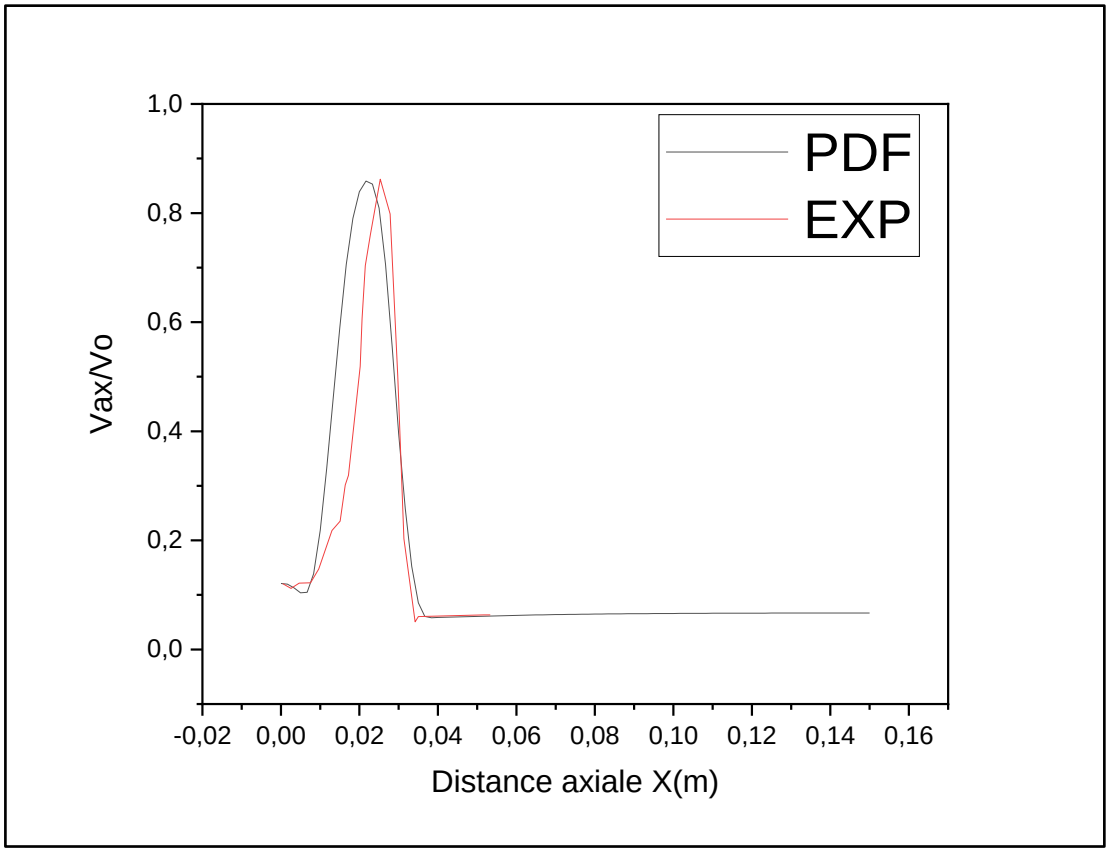

Figure IV.3 Validation des profils de vitesses axiales pour X/D=0.4.

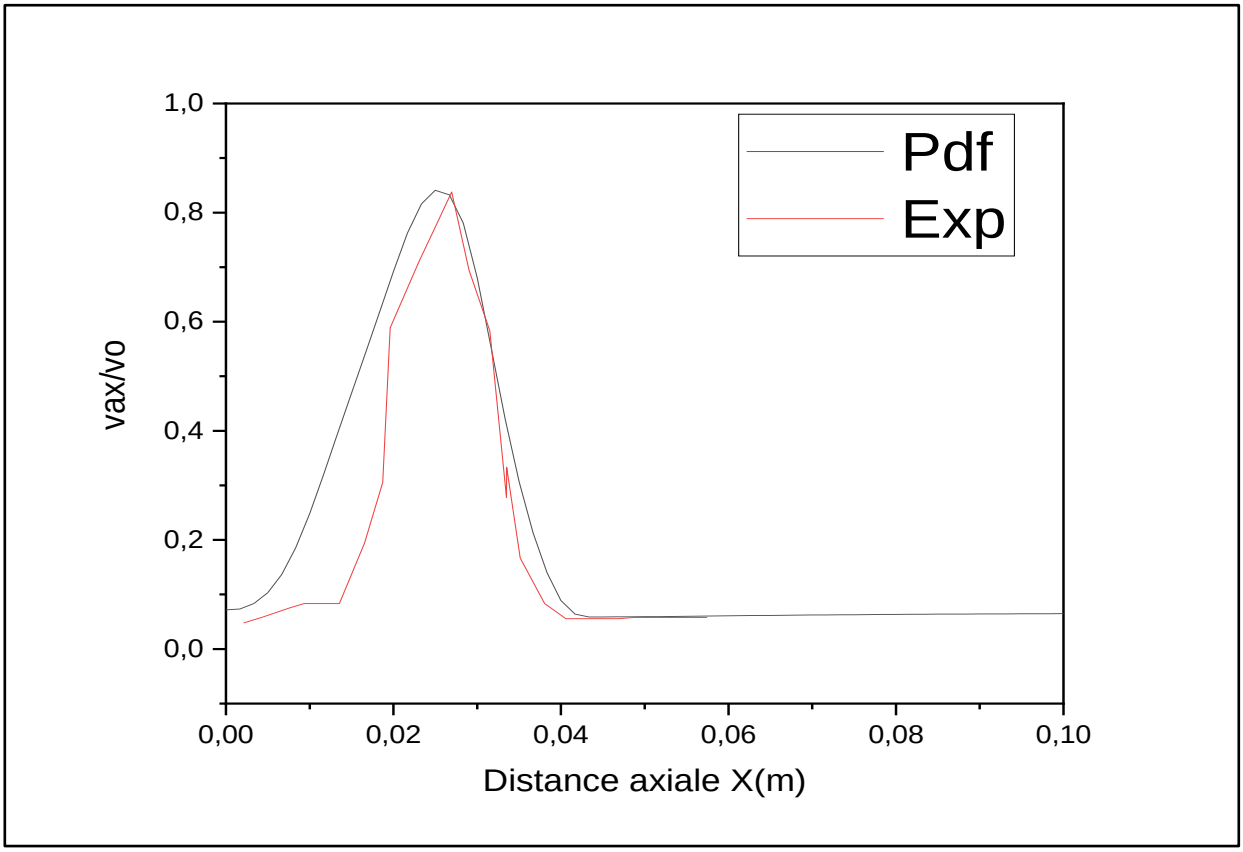

Figure IV.4 Validation des profils de vitesses axiales pour X/D=0.6.

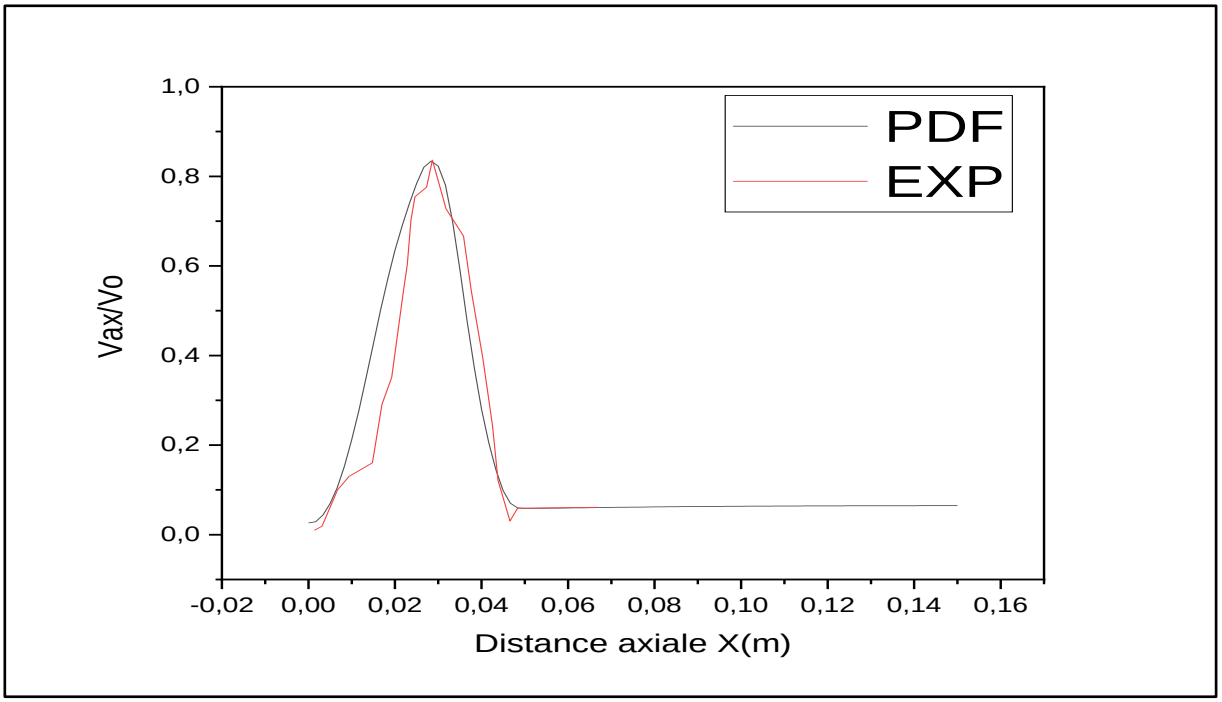

Figure IV.5 Validation des profils de vitesses axiales pour X/D=0.8.

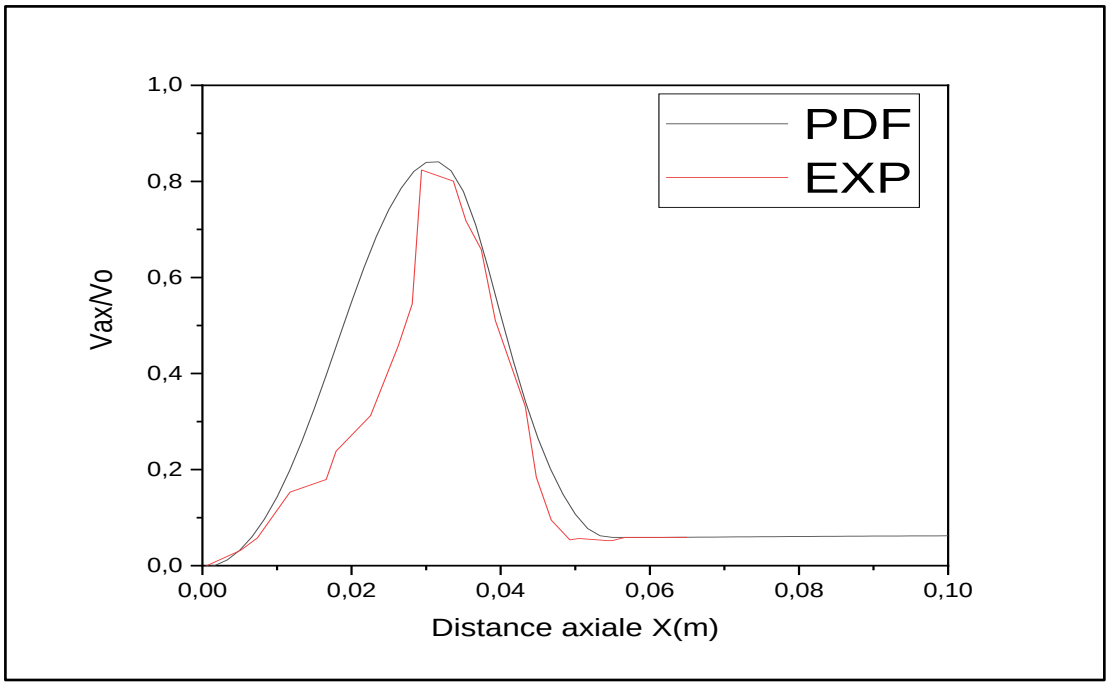

Figure IV.6 Validation des profils de vitesses axiales pour X/D=1.

IV.2.3 Validation de la distribution du CH4

La validation des profils de distributions du CH4 permet d'analyser les capacités des modèles de combustion utilisés à traiter la chimie. Cette analyse permet de déterminer la composition chimique du mélange en tous points et de localiser le front de flamme. La différence de traitement de la chimie par le modèle utilisé rend cette validation déterminante pour leurs choix. La figure montre la distribution du CH4 sur différentes sections radiales du domaine, pour les sections. Il est clair que pour X/D=0.2 et 0.4 (proche du bec), le modèle utilisé donne des résultats pratiquement identiques.

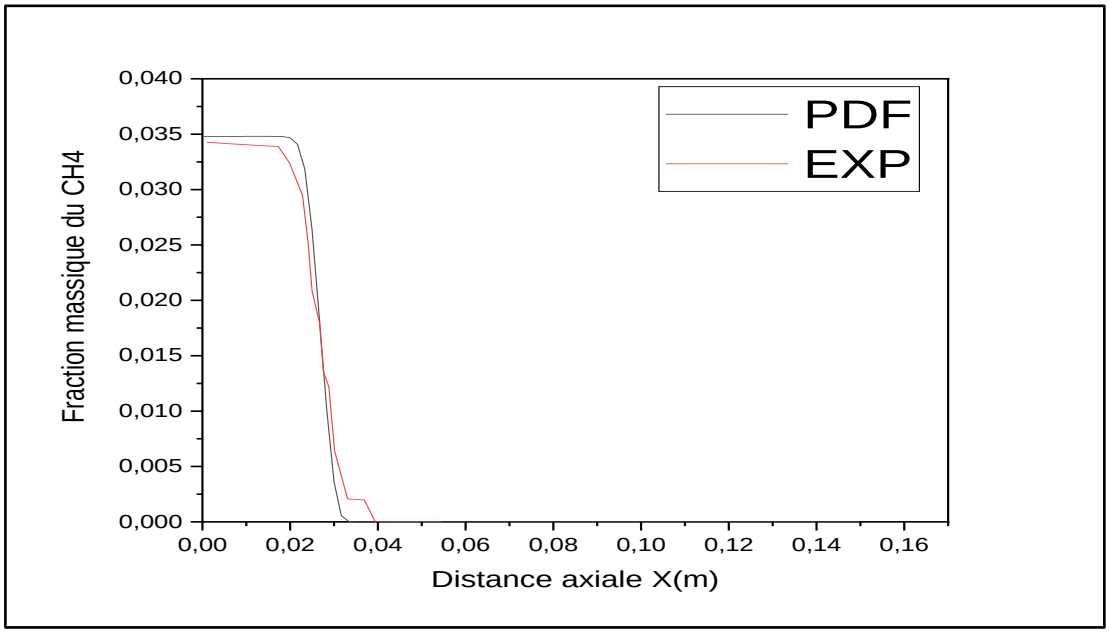

Figure IV.7 Validation des profils de distribution du CH4 pour X/D=0.2

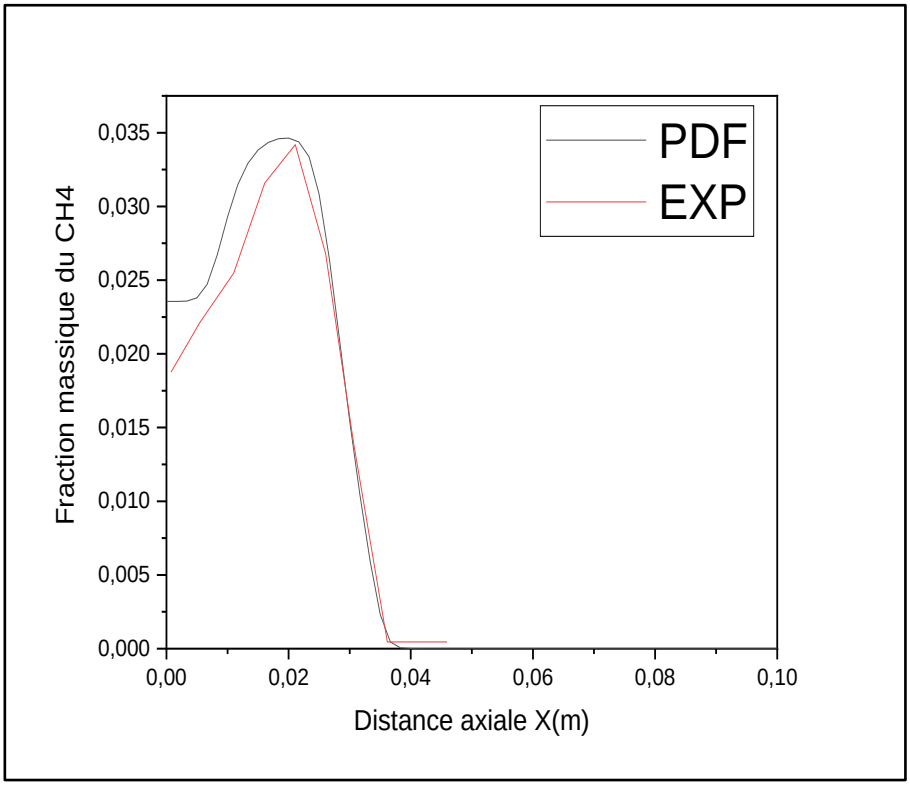

Figure IV.8 Validation des profils de distribution du CH4 pour X/D=0.4

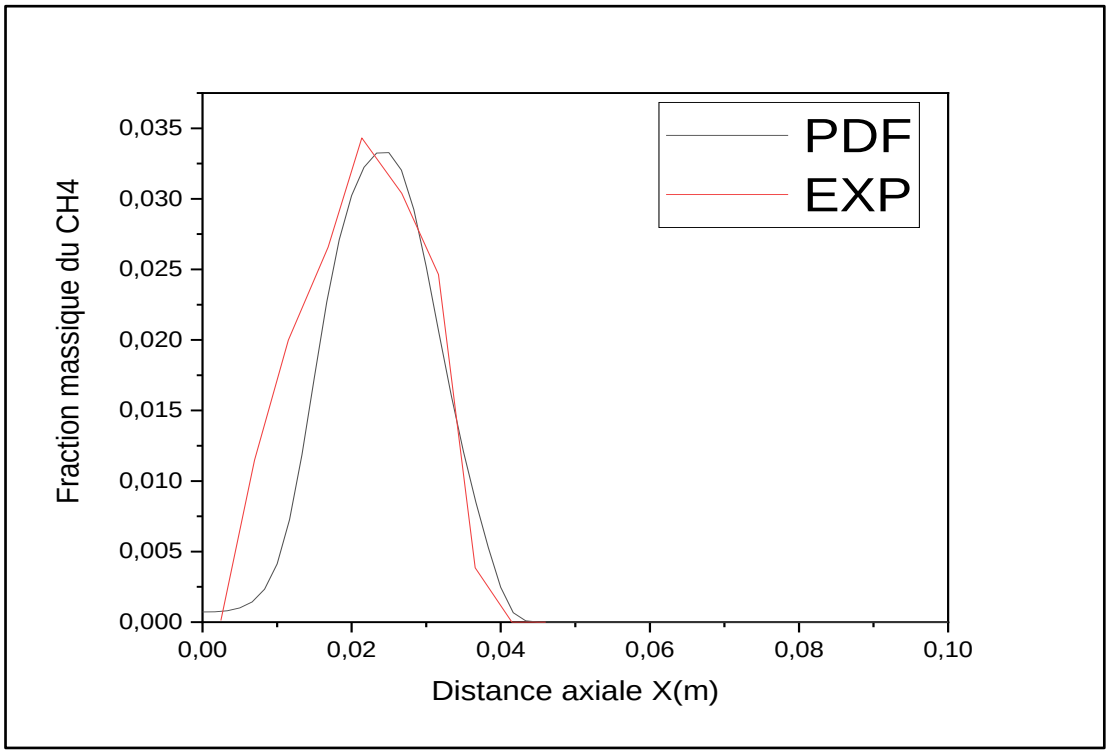

Figure IV.9 Validation des profils de distribution du CH4 pour X/D=0.6

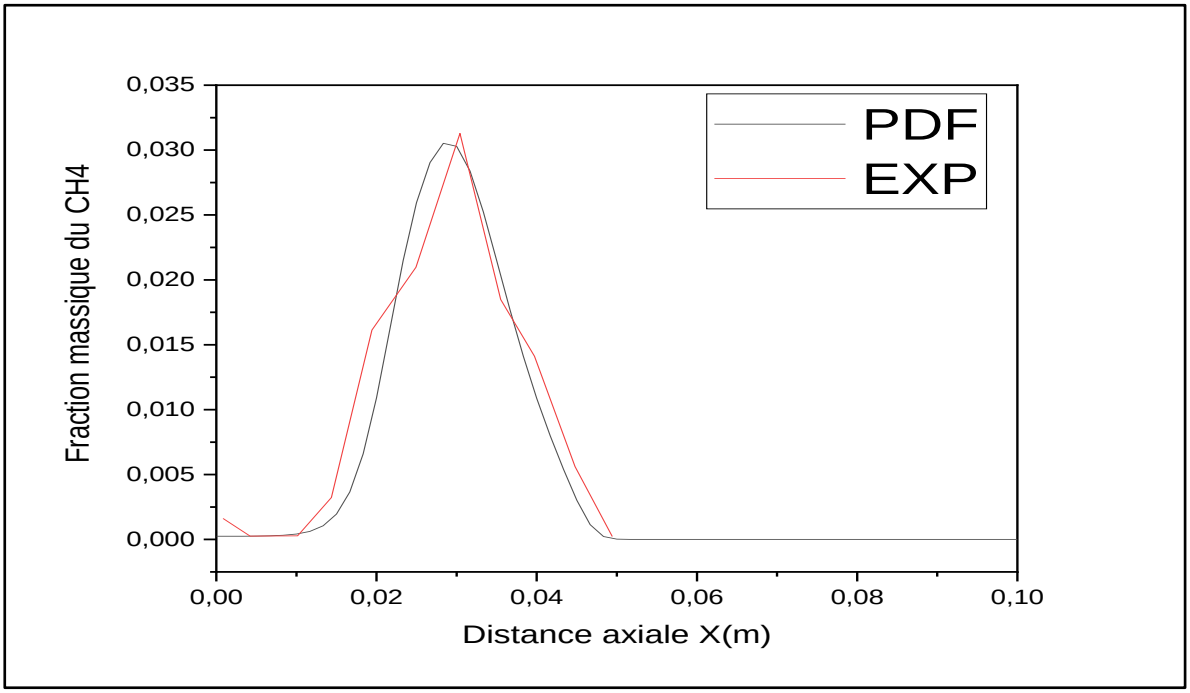

Figure IV.10 Validation des profils de distribution du CH4 pour X/D=0.8

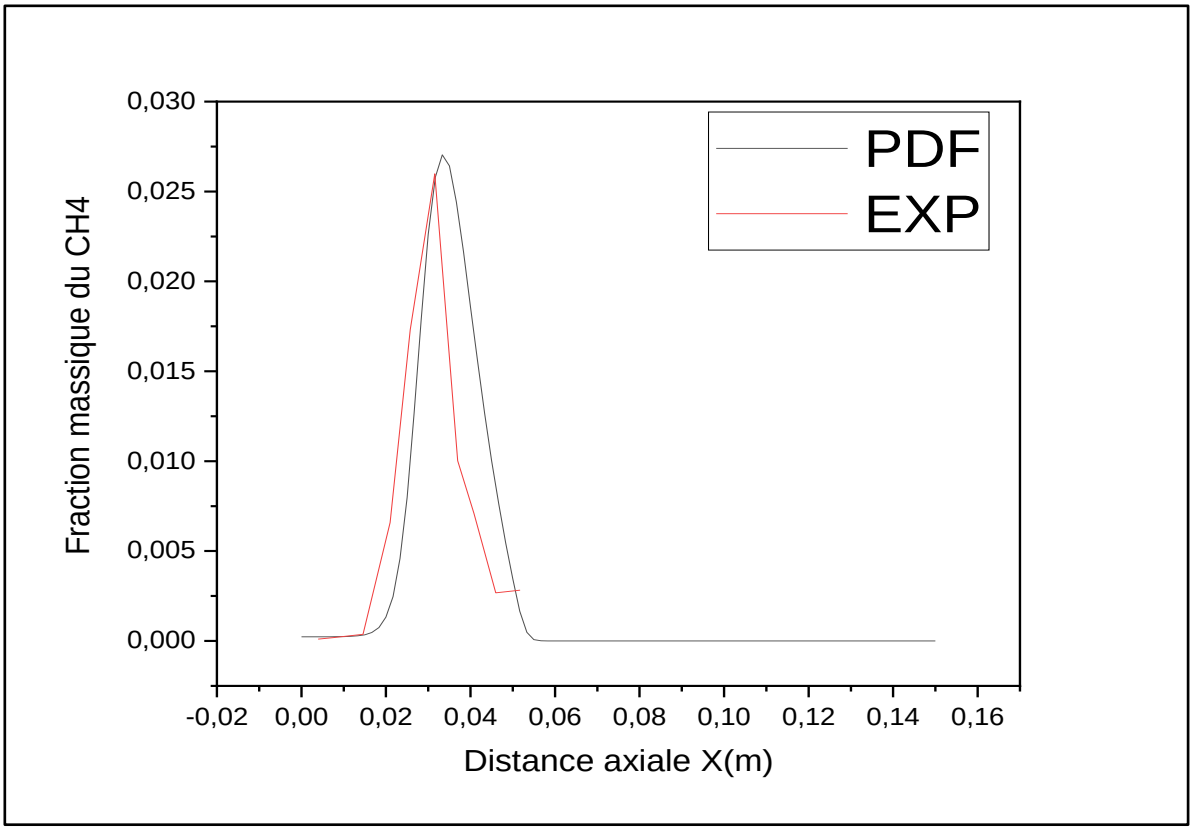

Figure IV.11 Validation des profils de distribution du CH4 pour X/D=1.

IV.3 Effet de la variation de l'hydrogène :

L'étude de la variation de l'hydrogène a pour but d'analyser le comportement des bruleurs LSB en mélange pauvre, On s'intéresse à plusieurs variables qui gouvernent la structure des flammes (température, vitesse, espèces chimiques (CO2, CO, CH4 et polluants). Le pourcentage d'hydrogène a été varié de 1% jusqu'à 10% avec un pas de 1, et on va traiter chaque pourcentage d'hydrogène puis déduire le meilleur pourcentage d'hydrogène pour notre bruleur LSB.

IV.3.1 Effet de l'hydrogène sur la température :

Les différents contours de température pour différents pourcentages d'hydrogène de 1 jusqu' a 10 :

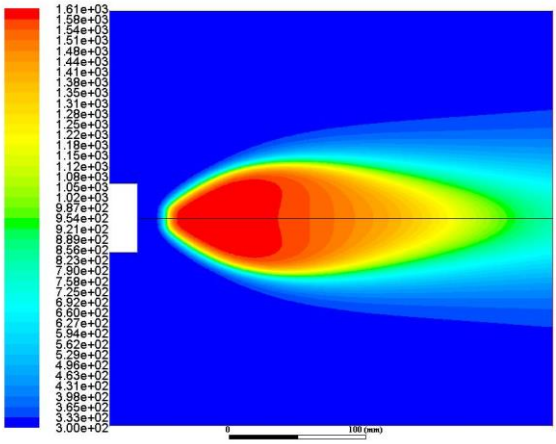

Figure IV.12: pour 1%

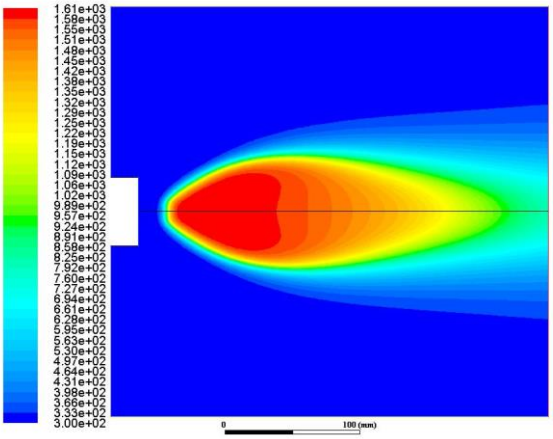

Figure IV.13 : pour 2%

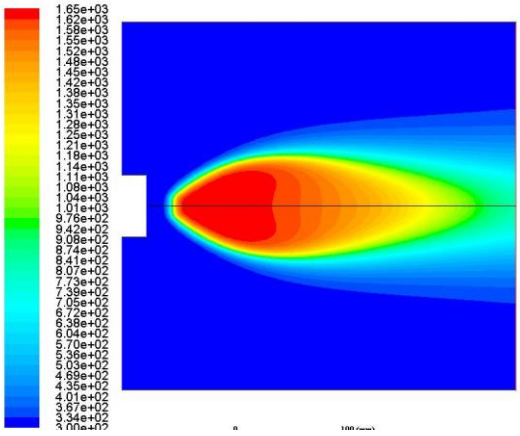

Figure IV.14 : pour 3%

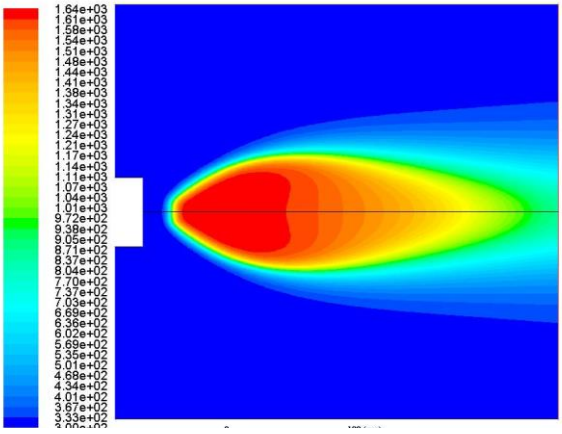

Figure IV.15 : pour 4%

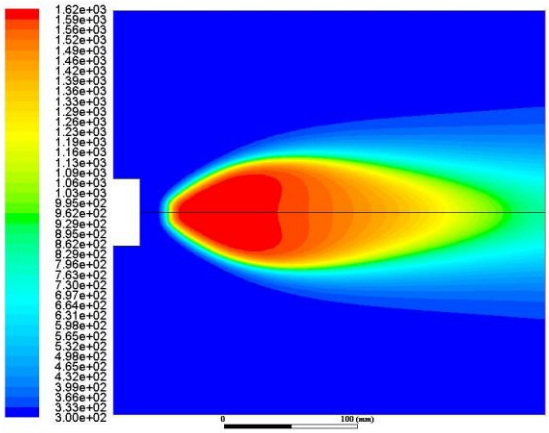

Figure IV.16 : pour 5 %

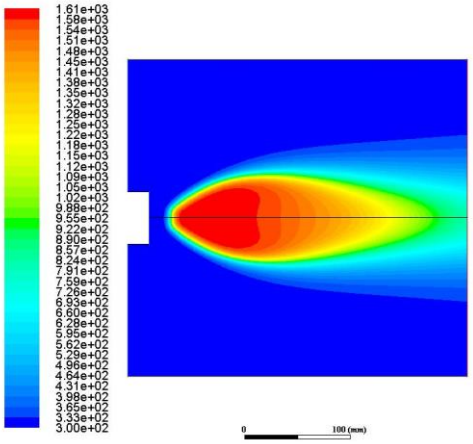

Figure IV.17 : pour 6%

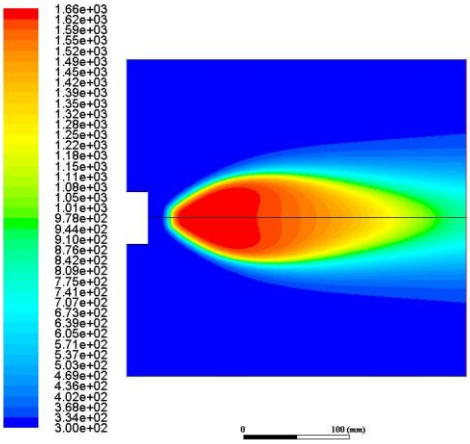

Figure IV.18 : pour 7%

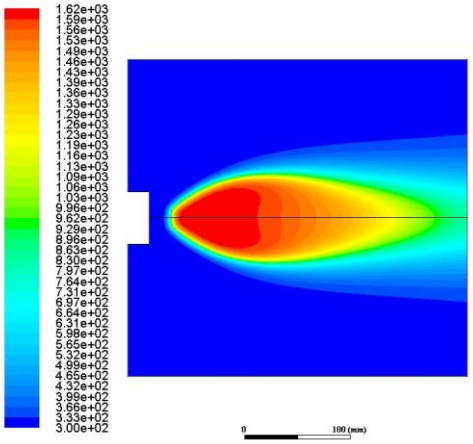

Figure IV.19 : pour 8%

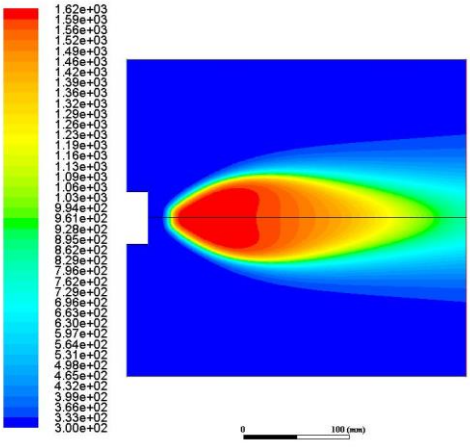

Figure IV.20 : pour 9%

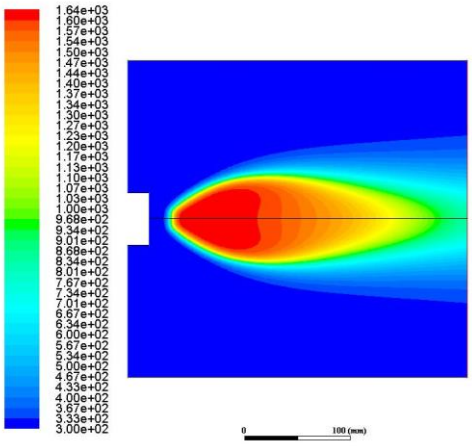

Figure IV.21: pour 10%

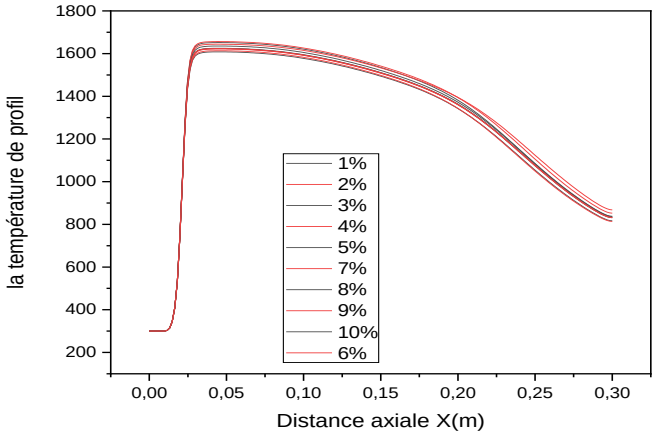

Figure IV.22 : effet de l'hydrogène sur la Température

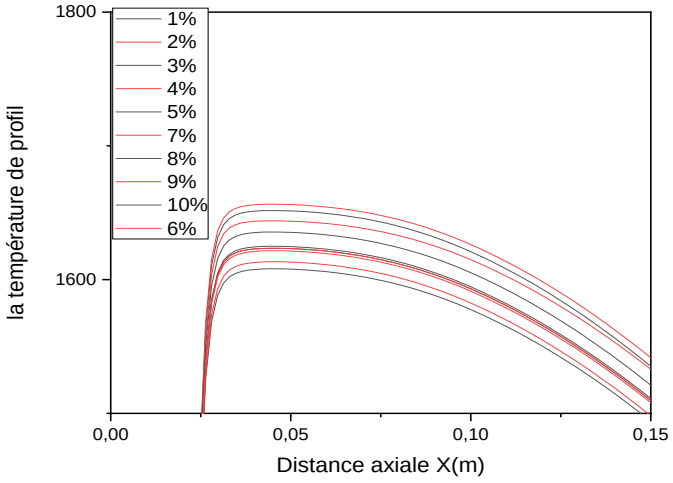

Figure IV.23 : effet de l'hydrogène sur la Température

Les figures et les contours montrent l'évolution de la température sur l'axe du bruleur pour différents pourcentages, on remarque que la température augmente faiblement d'un pourcentage a un autre. L'augmentation de l'hydrogène a montré un rapprochement entre le front de flamme et le bec du bruleur. Ce rapprochement peut provoquer la perturbation de la flamme qui est censé se maintenir à une certaine distance du bruleur (principe du LSB). La température augmente de 1610 k à 1680 K

IV.3.2 Effet de l'hydrogène sur la vitesse axiale :

Les différents contours de vitesse axiale pour différents pourcentages d'hydrogène de 1 jusqu' a 10 :

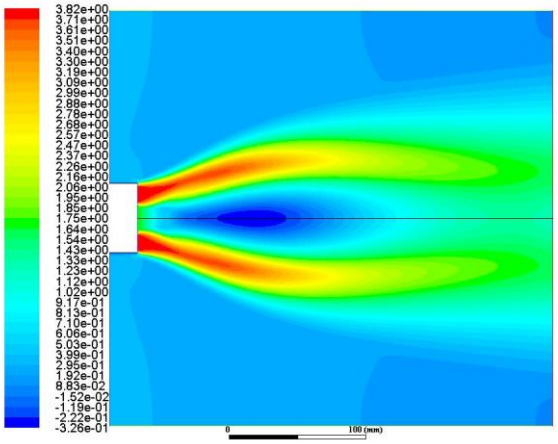

Figure IV.24 : pour 1%

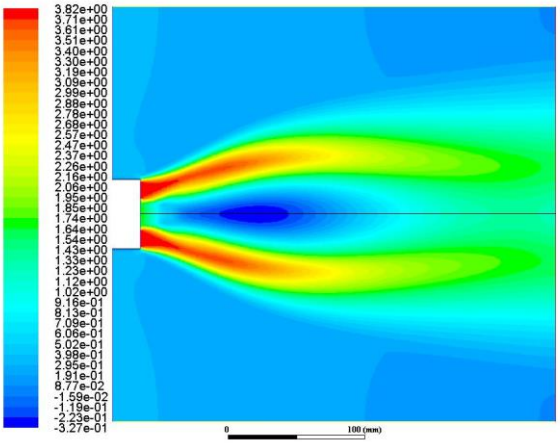

Figure IV.25 : pour 2%

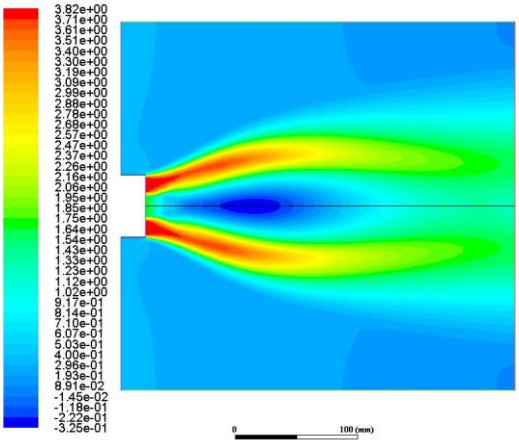

Figure IV.26 : pour 3%

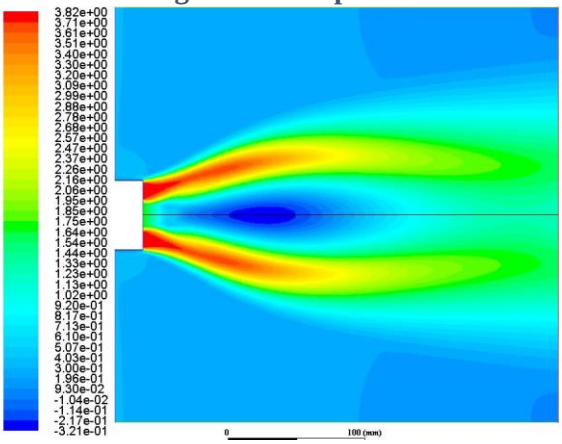

Figure IV.27 : pour 4%

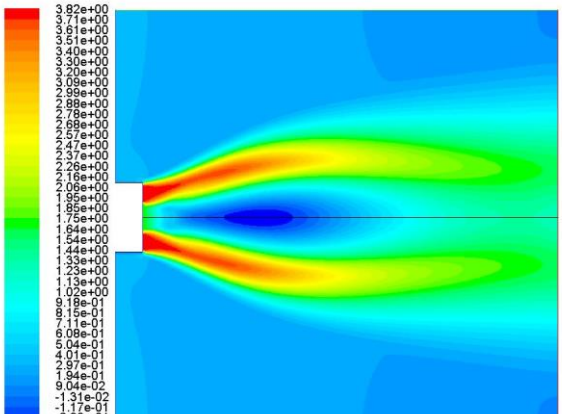

Figure IV.28 : pour 5%

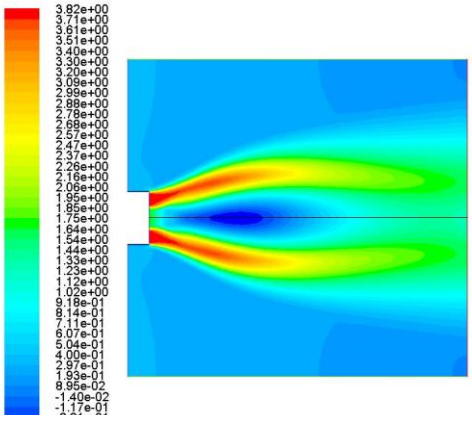

Figure IV.29 : pour 6%

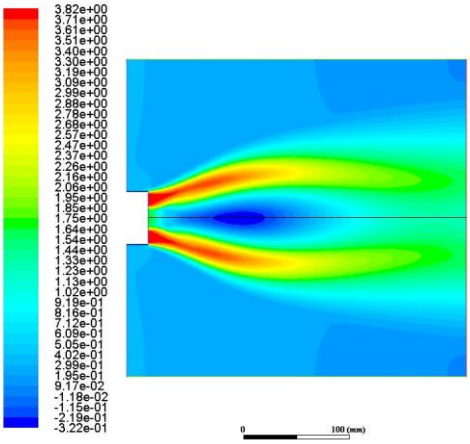

Figure IV.30 : pour 7%

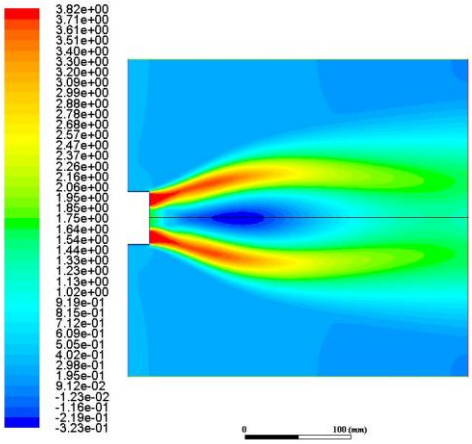

Figure IV.31 : pour 8%

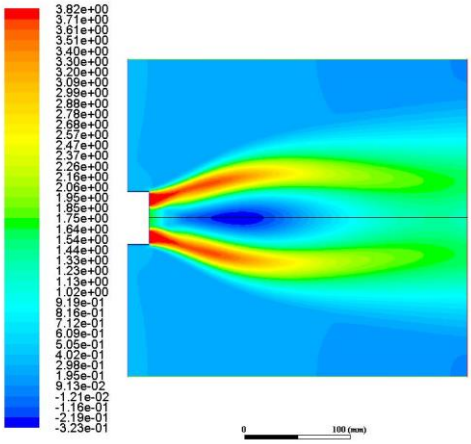

Figure IV.32 : pour 9%

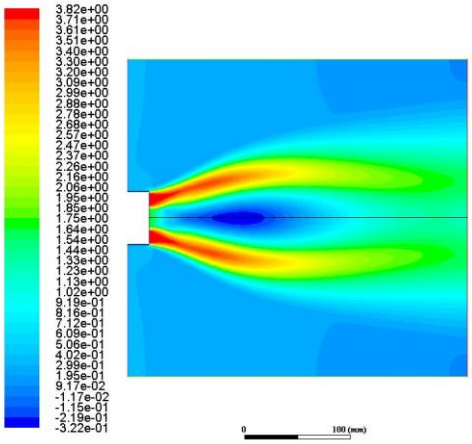

Figure IV.33 : pour 10%

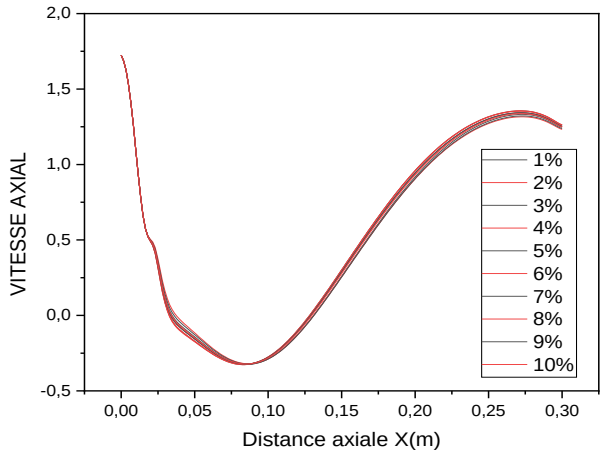

Figure IV. 34 : Effet de l'hydrogène sur la vitesse

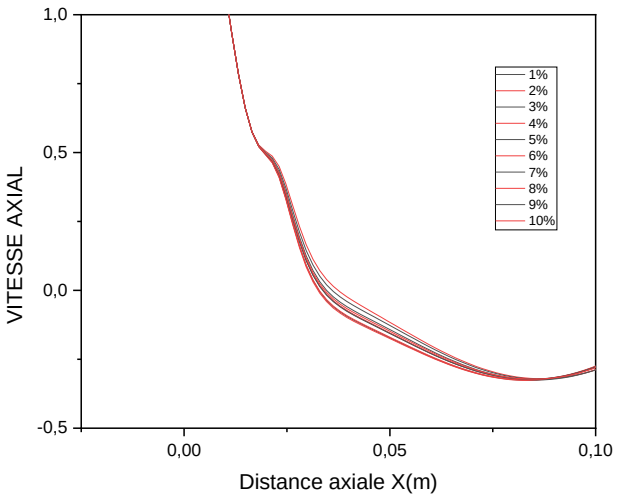

Figure IV.35 : Effet de l'hydrogène sur la vitesse

Les Figures et les contours montrent l'influence de l'hydrogène sur les champs de vitesses axial. La comparaison entre le cas est inerte montre des zones de recirculations, les valeurs des vitesses axiales variées (positives et négatif). Les valeurs des vitesses axiales augmentent à l'ajoute d'hydrogène pour une richesse constante le maximum de vitesse axiale atteint est noté pour le pourcentage 9%

IV.4 Effet de l'ajoute de l'hydrogène sur les espèces chimiques :

IV.4.1 Effet de l'ajoute de l'hydrogène sur le CH4 :

Les différents contours du CH4 pour différents pourcentages d'hydrogène de 1 jusqu' a 10 :

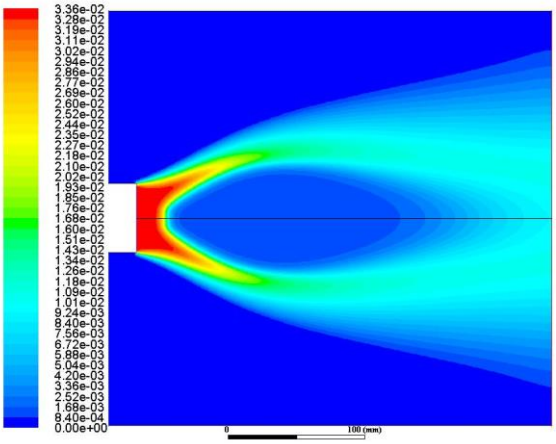

Figure IV.36 : pour 1%

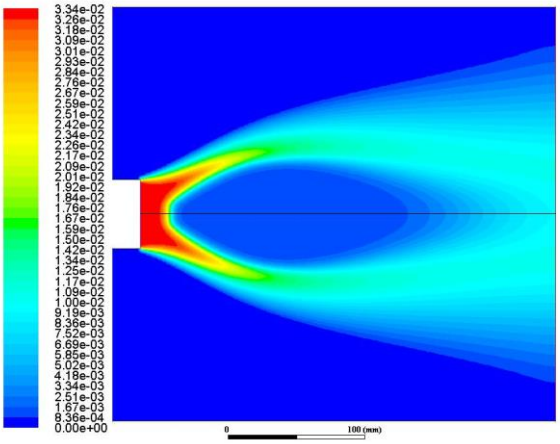

Figure IV.37 : pour 2%

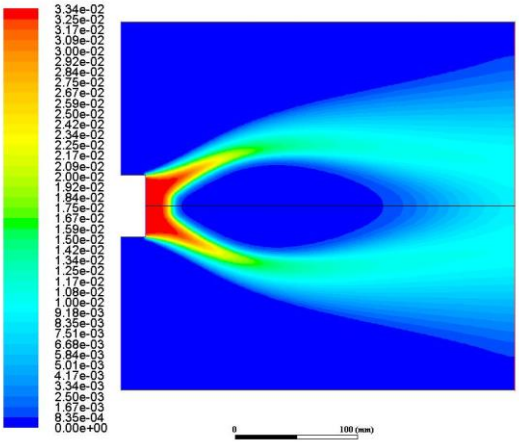

Figure IV.38 : pour 3%

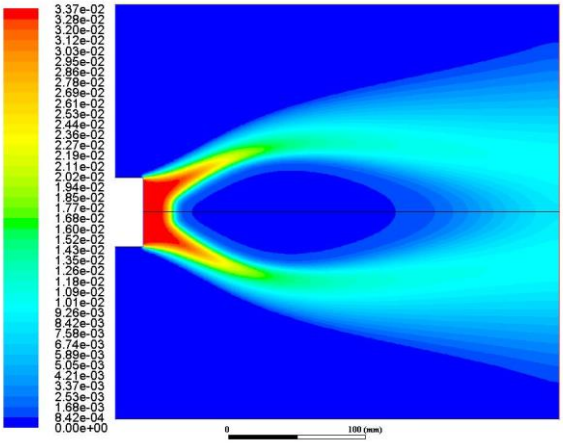

Figure IV.39 : pour 4%

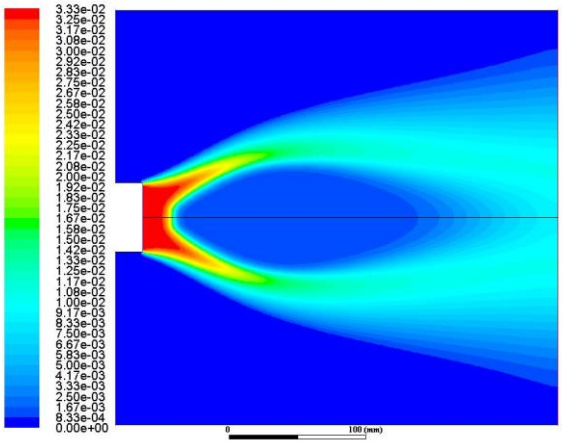

Figure IV.40 : pour 5%

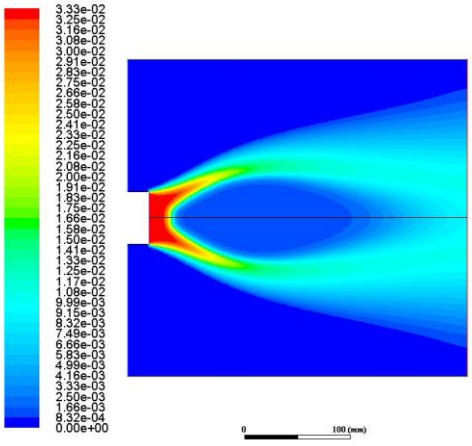

Figure IV.41 : pour 6%

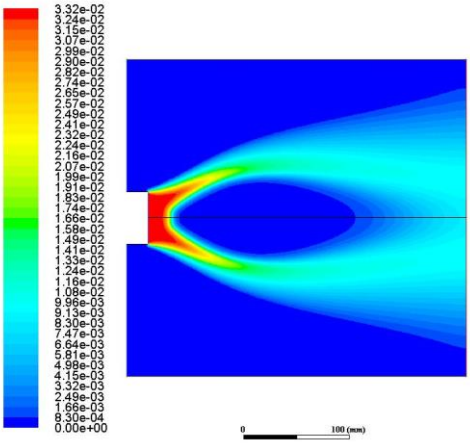

Figure IV.42 : pour 7%

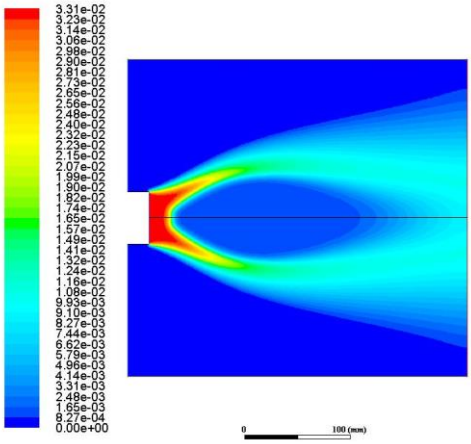

Figure IV.43 : pour 8%

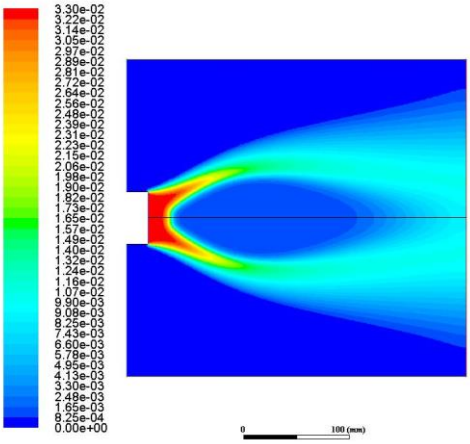

Figure IV.44 : pour 9%

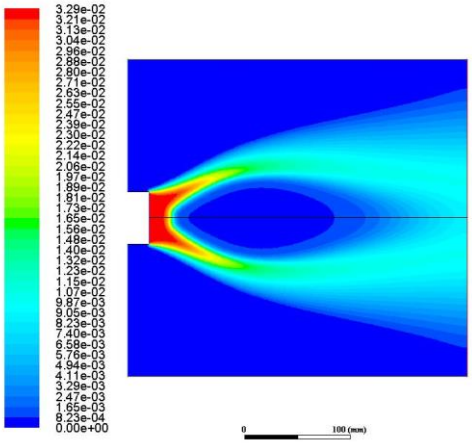

Figure IV.45 : pour 10%

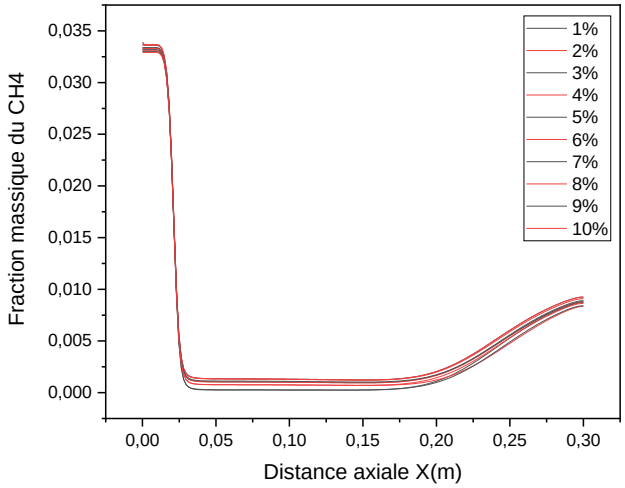

Figure IV.46 : Effet de l'hydrogène sur la fraction massique du CH4

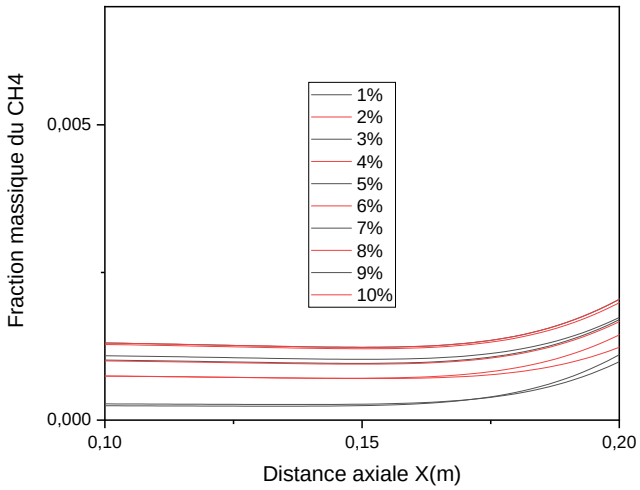

Figure IV.47 : Effet de l'hydrogène sur la fraction massique du CH4

Les distributions de la fraction massique du CH4 dans le domaine sont le résultat des champs dynamiques et thermiques correspondants. Les valeurs de la fraction massique du CH4 diminue on remarque que le meilleur pourcentage est de 7%

IV.4.2 Effet de l'ajoute de l'hydrogène sur le NOX :

Les différents contours du NOX pour différents pourcentage d'hydrogène de 1% jusqu' à 10% :

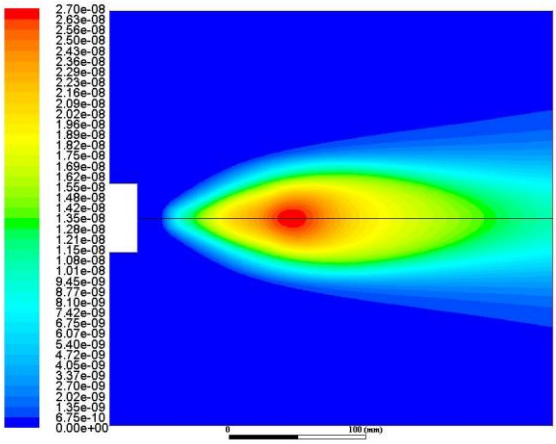

Figure IV.48 : pour 1%

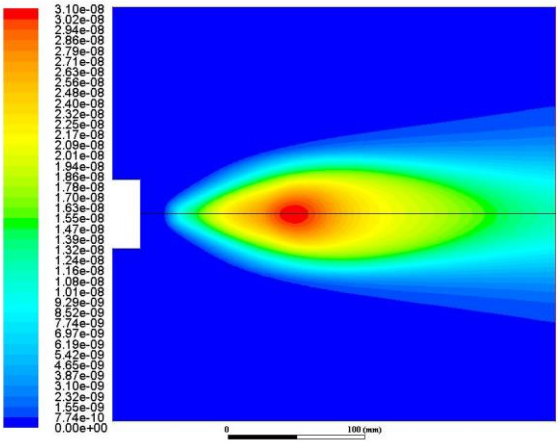

Figure IV.49 : pour 2%

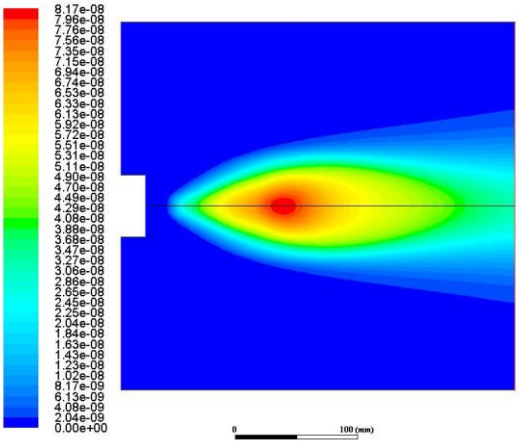

Figure IV.50 : pour 3%

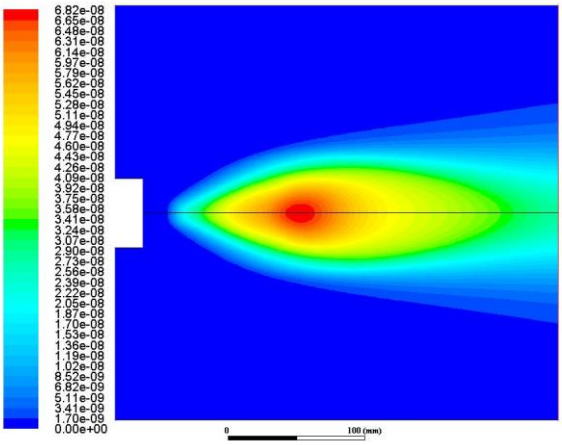

Figure IV.51 : pour 4%

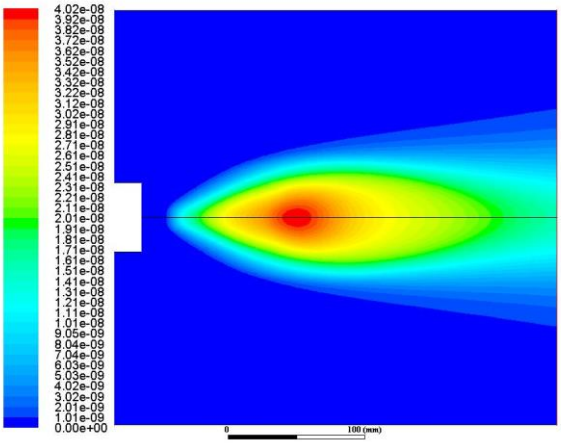

Figure IV.52 : pour 5%

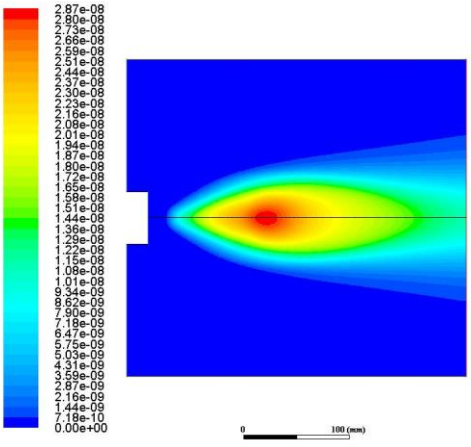

Figure IV.53 : pour 6%

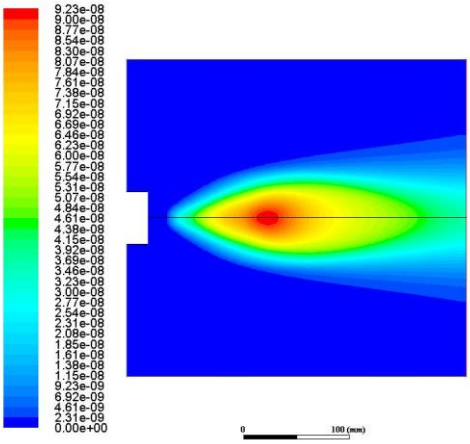

Figure IV.54 : pour 7%

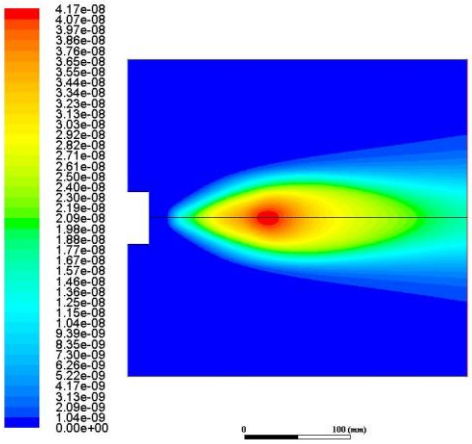

Figure IV.55 : pour 8%

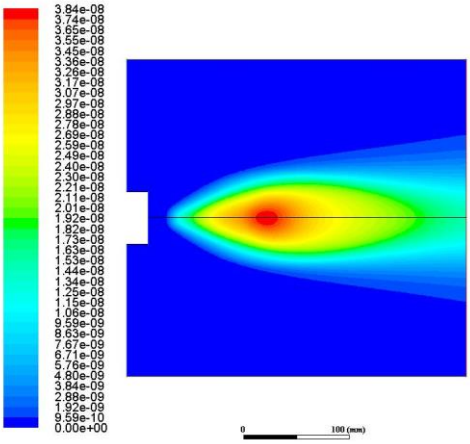

Figure IV.56 : pour 9%

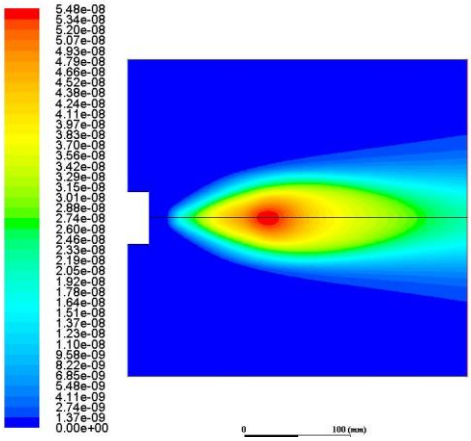

Figure IV.57 : pour 10%

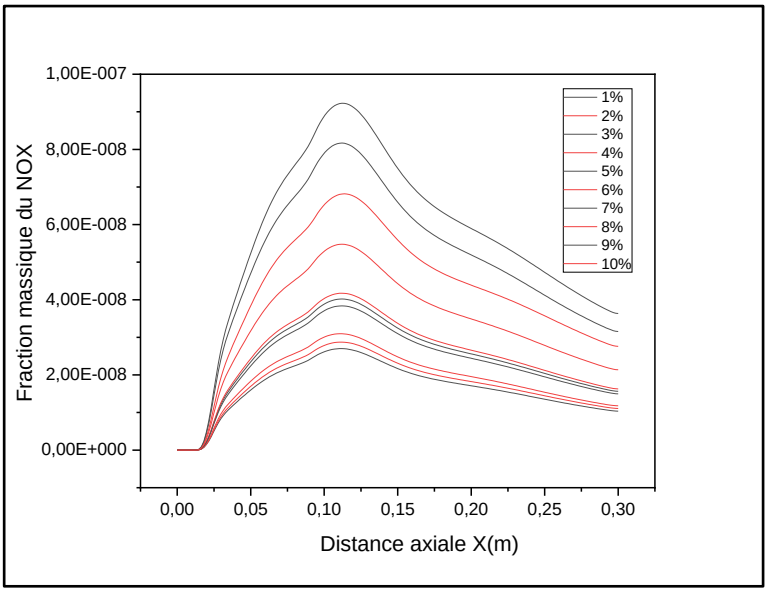

Figure IV.58 : Effet de l'hydrogène sur la fraction massique du NOX

L’analyse de l’apparition des NOx est un but majeur dans cette étude. Les Figure précédents montrent que l’augmentation de l’hydrogène dans le domaine une richesse constante, crée une plus grande quantité de NOx en accord avec les zones à hautes températures cella est du le pouvoir calorifique du H2

IV.4.3 Effet de l'ajoute de l'hydrogène sur le CO2 :

Les différents contours du CO2 pour différents pourcentage d'hydrogène de 1% jusqu' à 10% :

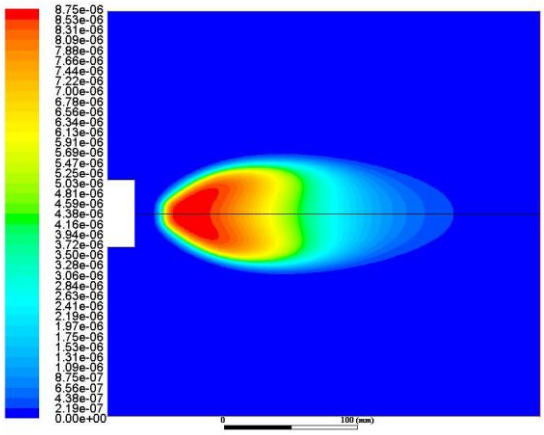

Figure IV.59 : pour 1%

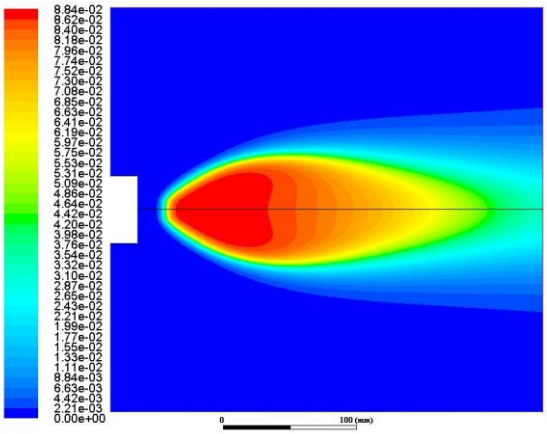

Figure IV.60 : pour 2%

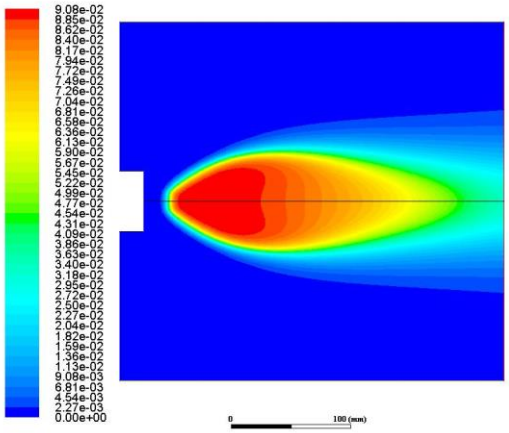

Figure IV.61 : pour 3%

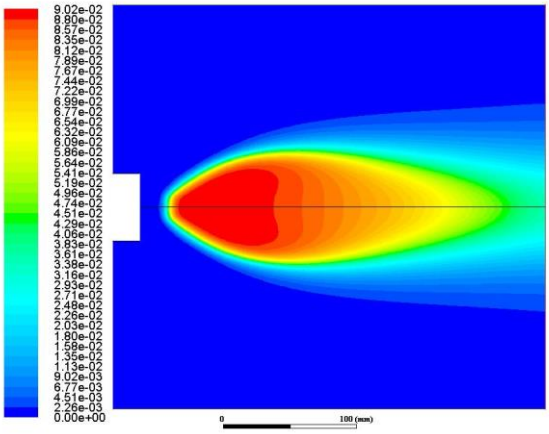

Figure IV.62 : pour 4%

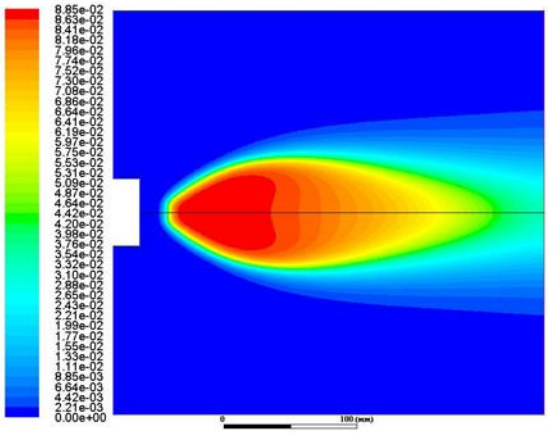

Figure IV.63 : pour 5%

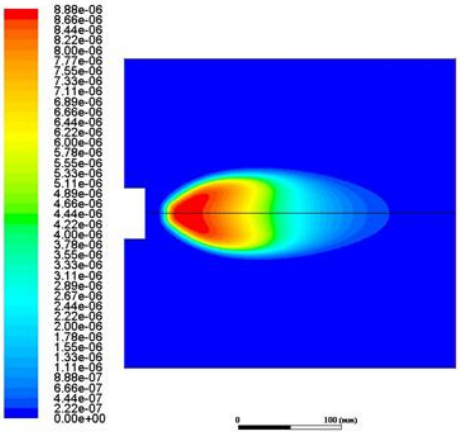

Figure IV.64 : pour 6%

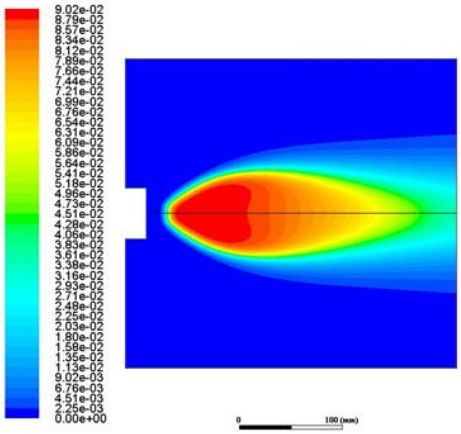

Figure IV.65 : pour 7%

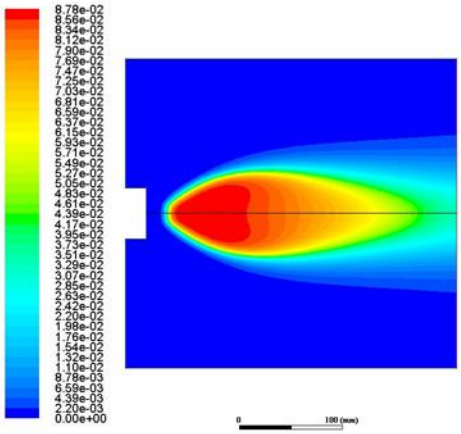

Figure IV.66 : pour 8%

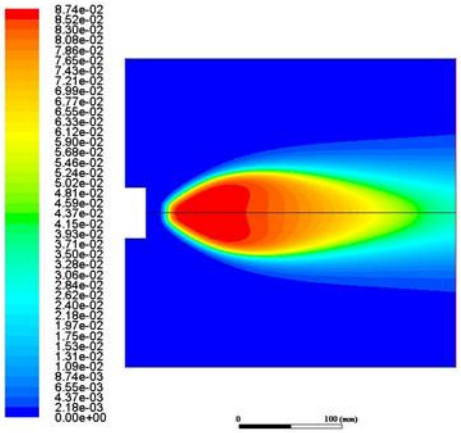

Figure IV.67 : pour 9%

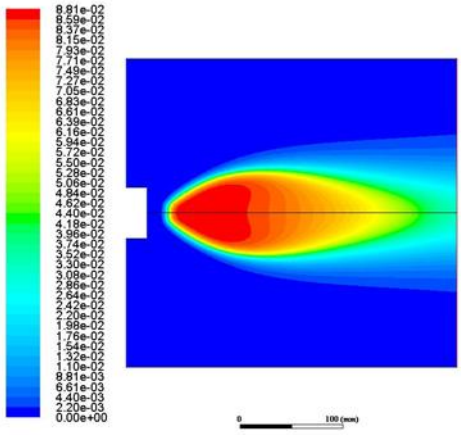

Figure IV.68 : pour 10%

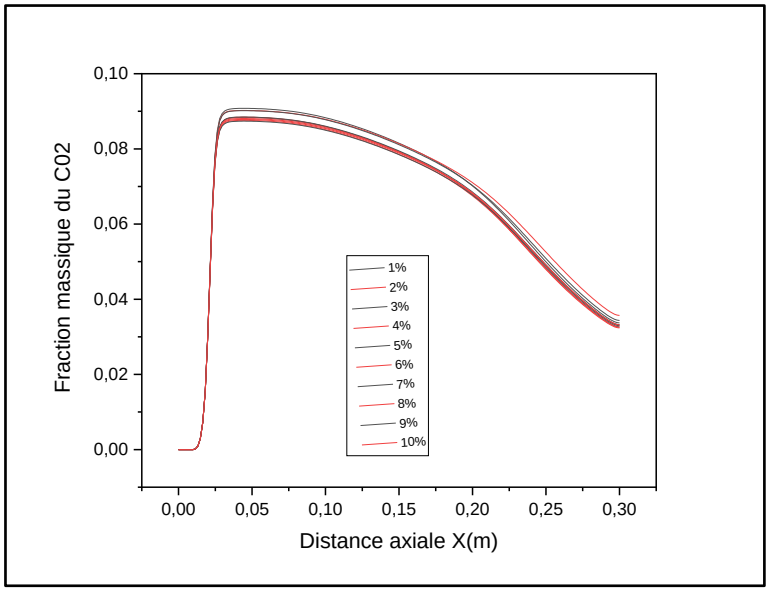

Figure IV.69 : Effet de l'hydrogène sur la F M du co2

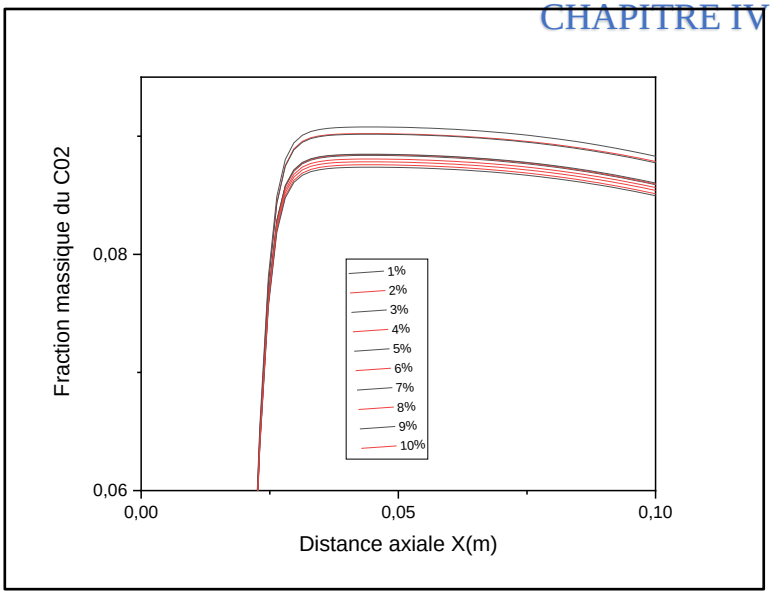

Figure IV.70 : Effet de l'hydrogène sur la FM co2

L'analyse de l'apparition du CO2 dans une étude de combustion portée sur les polluants est très importante contrairement au processus de développement des Nox.' apparition du CO2 ne dépend pas de la température.

IV.4.4 Effet de l'ajoute de l'hydrogène sur le CO :

Les différents contours du CO pour différents pourcentages d'hydrogène de 1% jusqu' à 10% :

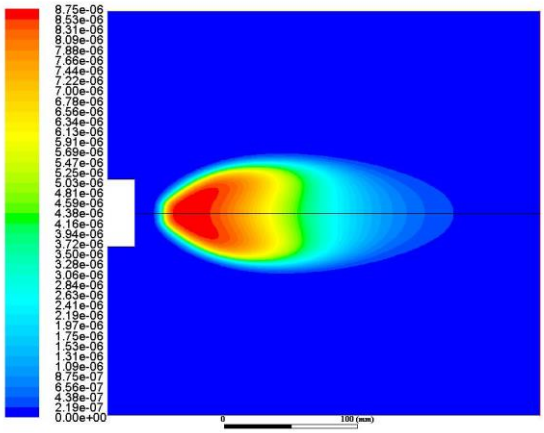

Figure IV.71 : pour 1%

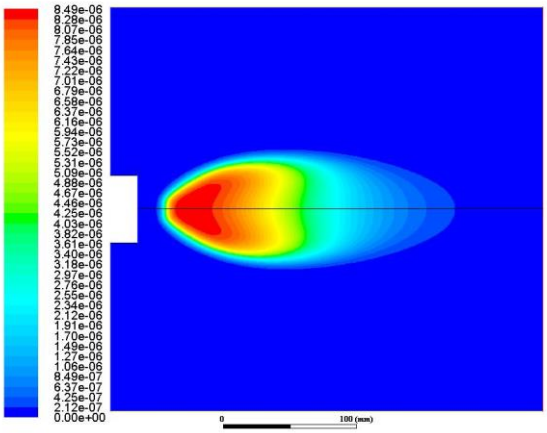

Figure IV.72 : pour 2%

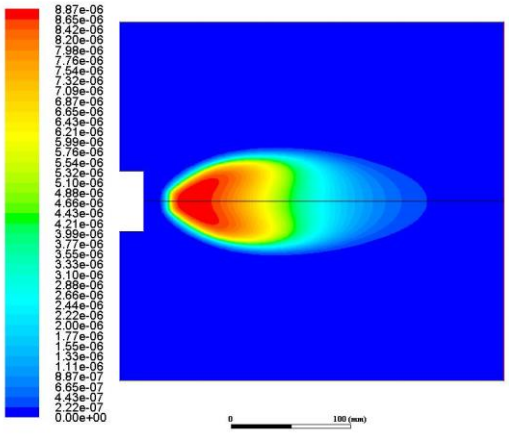

Figure IV.73 : pour 3%

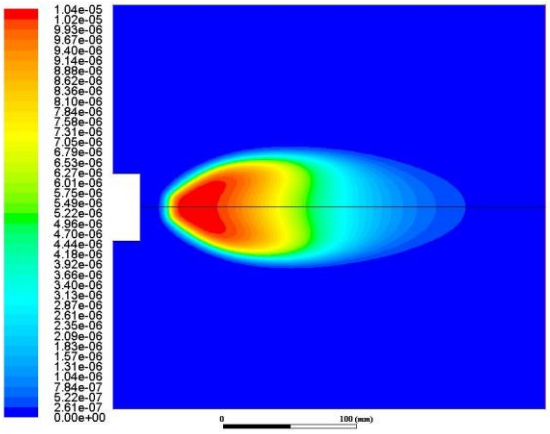

Figure IV.74 : pour 4%

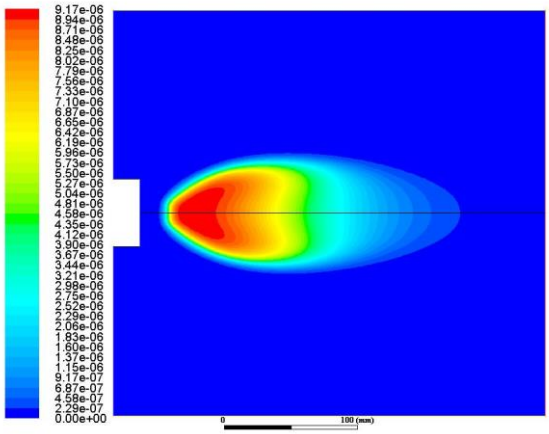

Figure IV.75 : pour 5%

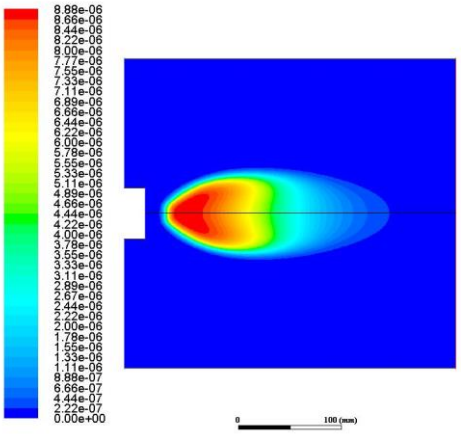

Figure IV.76 : pour 6%

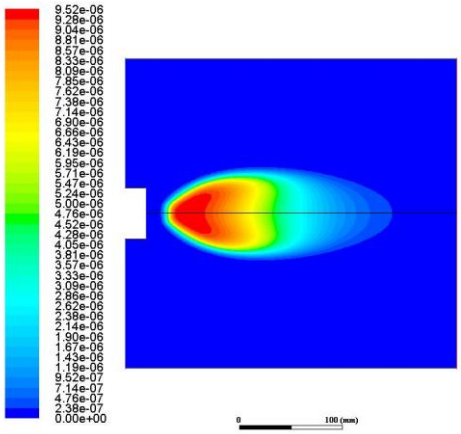

Figure IV.77 : pour 7%

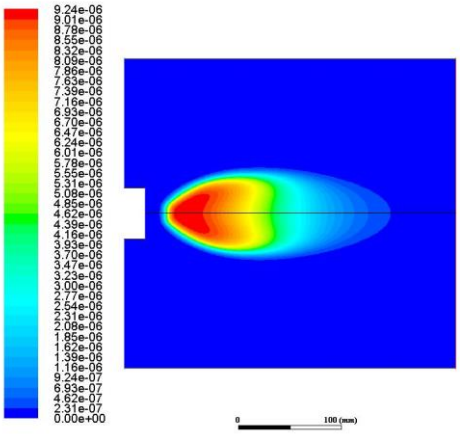

Figure IV.78 : pour 8%

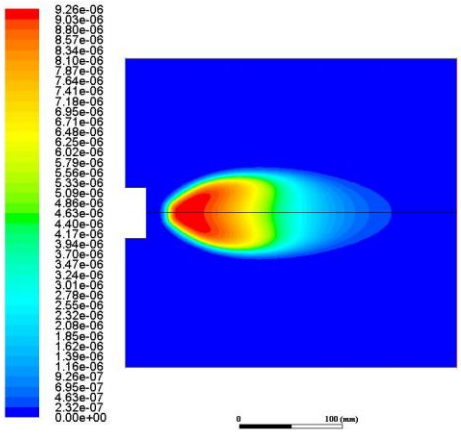

Figure IV.79 : pour 9%

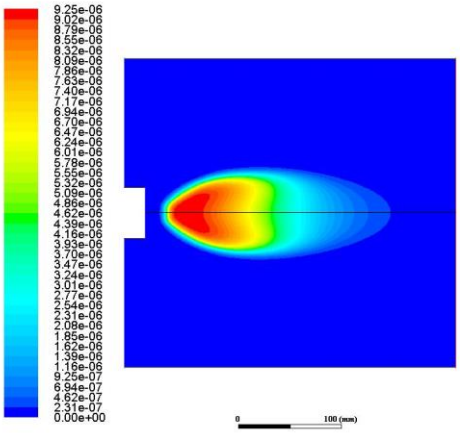

Figure IV.80 : pour 10%

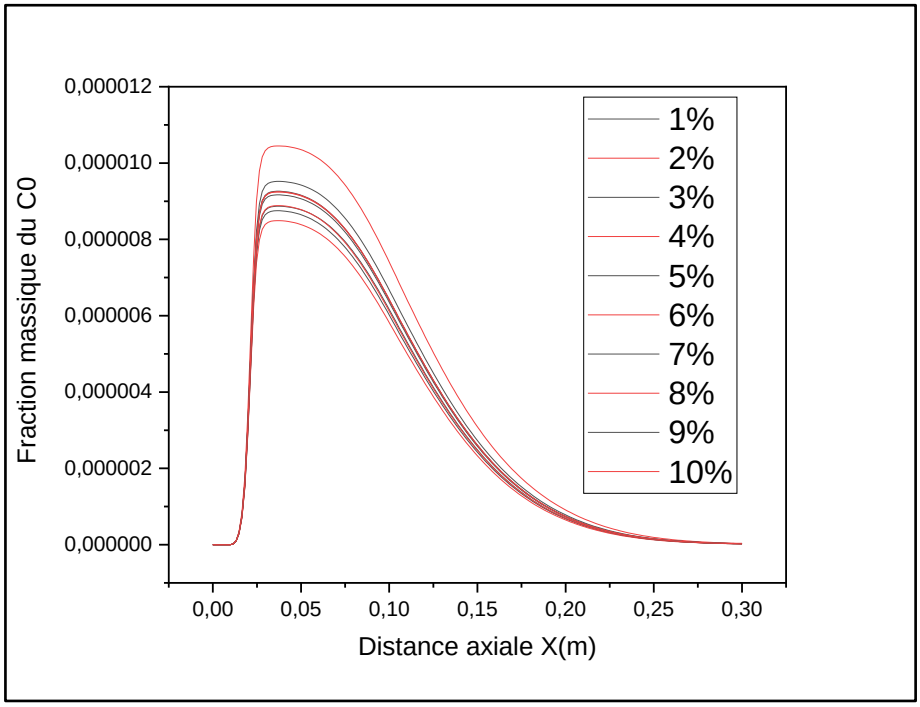

Figure IV.81 : Effet de l'hydrogène sur la FM Co

L'analyse de l'apparition du CO dans une étude de combustion portée sur les polluants est très importante. Contrairement au processus de développement des NOx, l'apparition du CO ne dépend pas de la température. Cela peut être expliqué par le phénomène de soufflage de flamme. Pour notre cas, la flamme se stabilise plus loin sur la direction axiale du bruleur créant ainsi une plus faible quantité de CO. Le meilleur pourcentage est 5%

IV.4.5 Effet de l'ajoute de 0% d'hydrogène (CH4 pur) :

Dans cette partie on va prendre 0% d'hydrogène et une richesse de 0.6 et on va les compares avec le mélange hydrogène / méthane.

IV.4.5.1 Effet de 0% d'hydrogène sur la température :

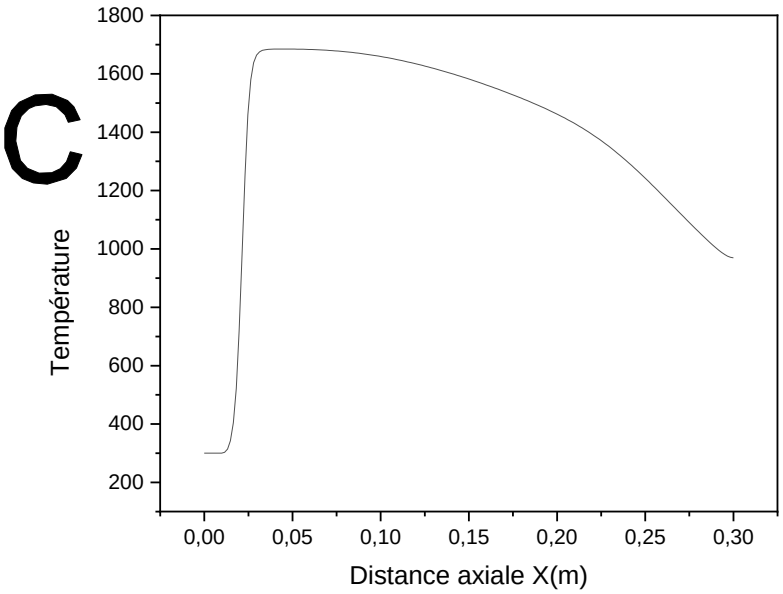

Figure IV.82 : Effet de 0% l'hydrogène sur le profil de température

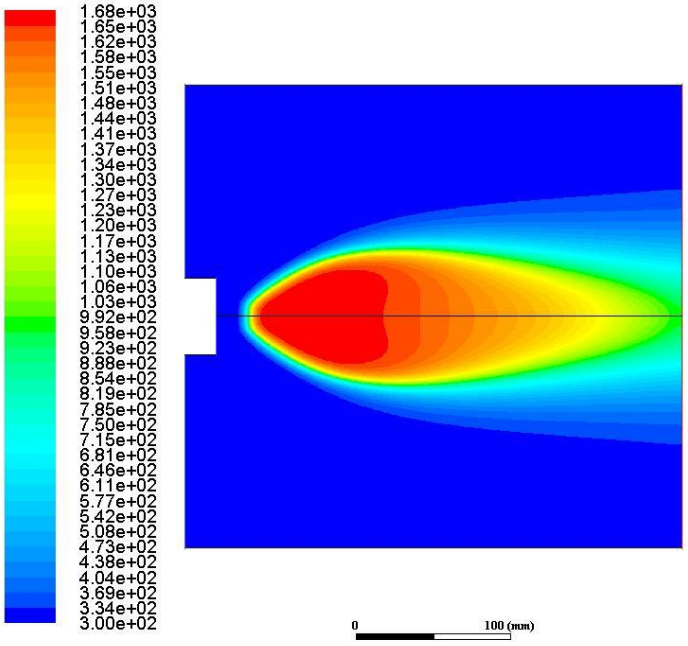

Figure IV.83 : Contours de température

IV.4.5.2 Effet de 0% d'hydrogène sur la vitesse :

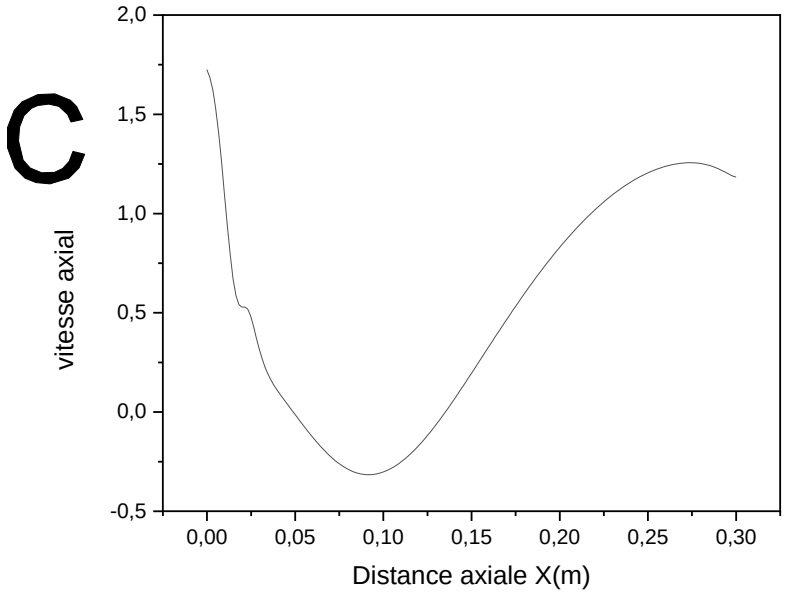

Figure IV.84 : Effet de l'hydrogène sur 1a vitesse

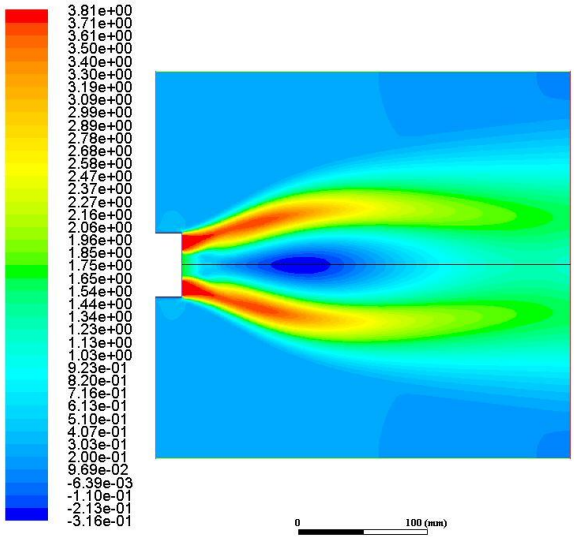

Figure IV.85 : contours de vitesse

IV.4.5.3 Effet de 0% d'hydrogène sur la fraction massique du CH4:

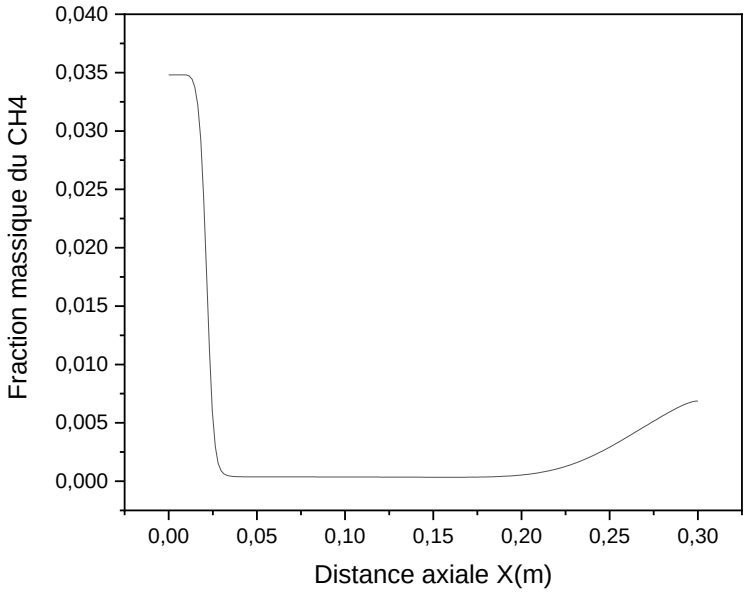

Figure IV.86: Effet de l'hydrogène sur 1a fraction massique du CH4

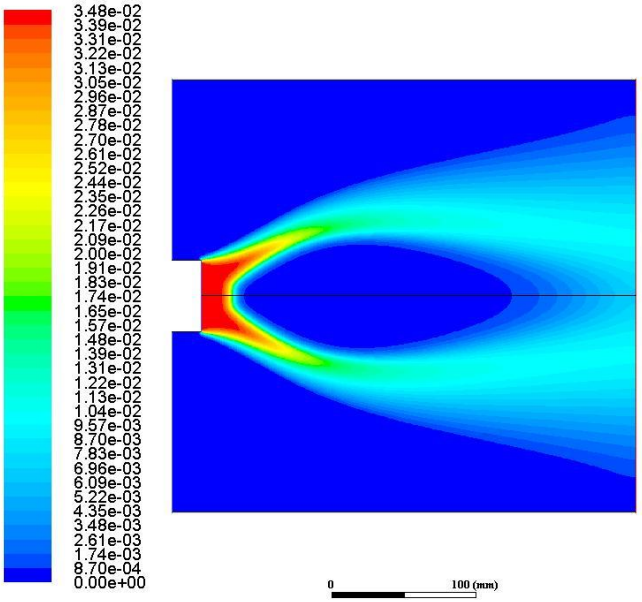

Figure IV.87: contours du CH4

IV.4.5.4 Effet de 0% d'hydrogène sur la fraction massique du NOX :

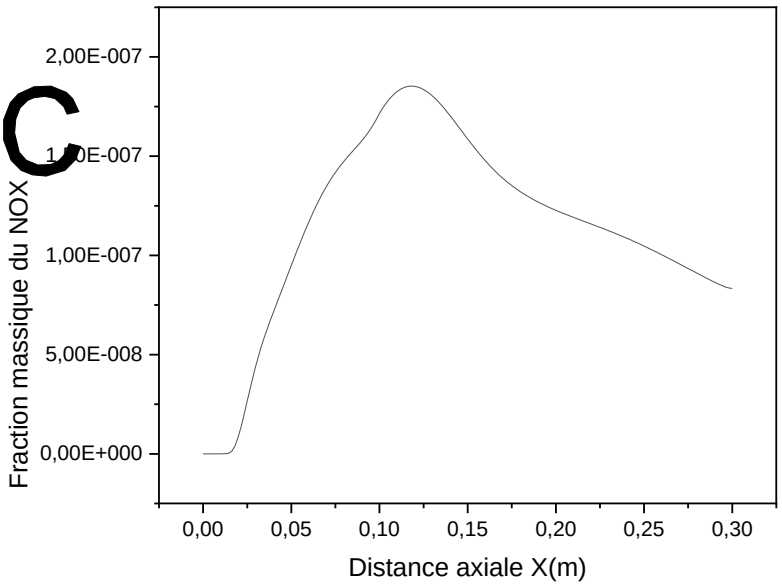

Figure IV.88 : Effet de l'hydrogène sur la fraction massique du NOX

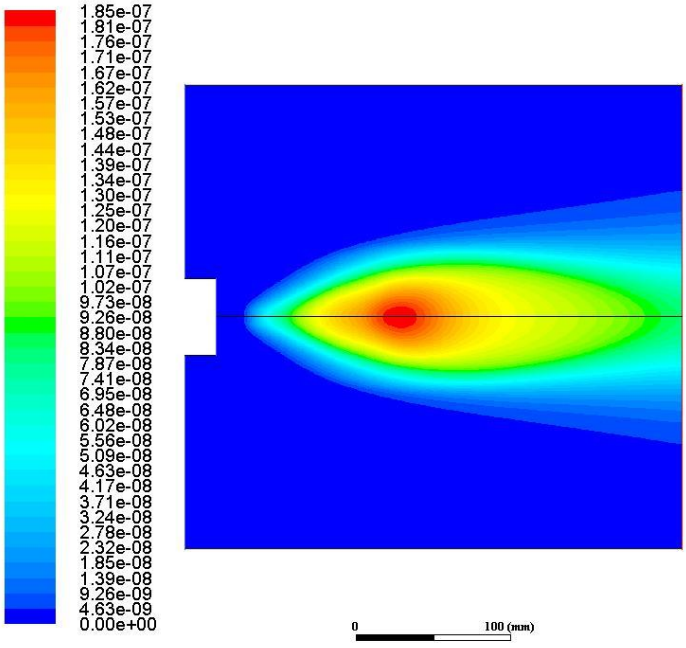

Figure IV.89: contours du NOX

IV.4.5.5 Effet de 0% d'hydrogène sur la fraction massique du CO2 :

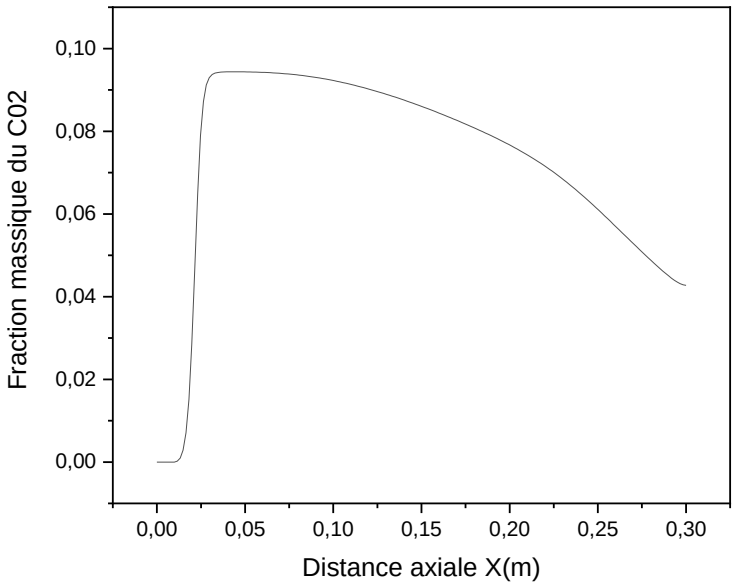

Figure IV.90 : Effet de l'hydrogène sur 1a fraction massique du CO2

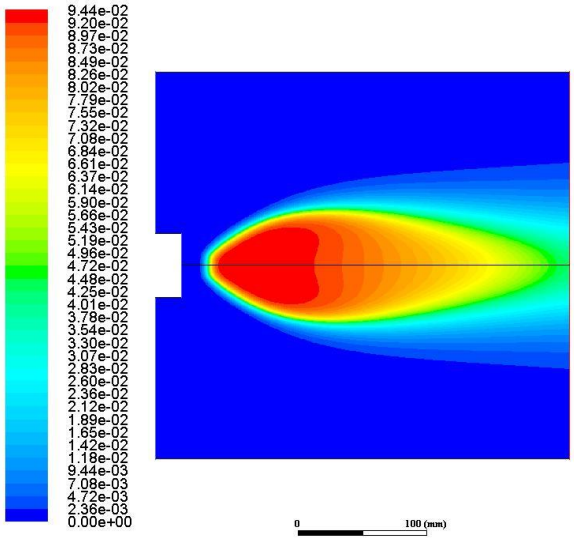

Figure IV.91 : contours du CO2

IV.4.5.6 Effet de 0% d'hydrogène sur la fraction massique du CO :

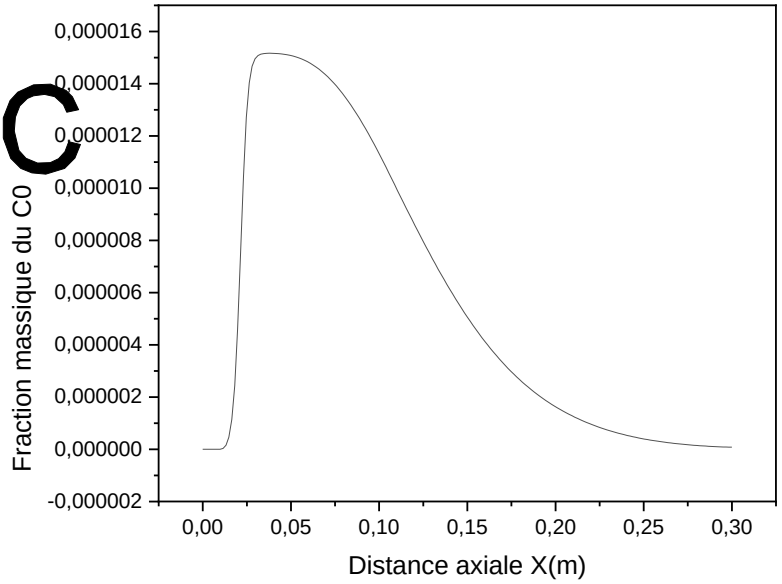

Figure IV.92 : Effet de l'hydrogène sur 1a fraction massique du CO

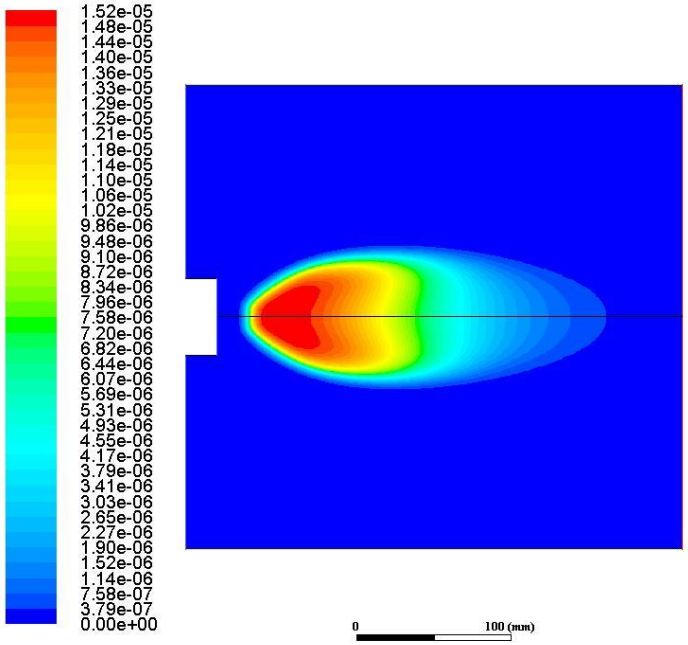

Figure IV.93: contours du CO

Dans cette partie on compare tous les pourcentages avec le pourcentages 0% ont conclue qu'hydrogène un impact important sur la diminution du co2 et du Co sans pour entant augments la fraction massique du NOX mais avec une légère augmentation de température.

IV.5 Conclusion :

Les figures précédant montrent pour les taux d'enrichissement en hydrogène de 0% jusqu'a10% La vitesse, et la fraction de mélange sont directement proportionnelles au taux d'hydrogène ajouté. La densité et les émissions de CO et CO2 sont inversement proportionnelles à l'enrichissement à l'hydrogène. Les résultats trouvés sont satisfaisants et reproduisent très bien la réalité physique du phénomène surtout pour les taux de 7% et 8% d'H2. En général, la variation de ces paramètres et légèrement inférieure comparativement à celle du cas de l'augmentation de la richesse. Du point de vue réactivité du mélange et stabilisation de la flamme, on a remarqué qu'un dopage de 10% produit un effet semblable à une richesse 0.7, la même chose pour un dopage de 0% qui est presque similaire à la richesse 0.6. La production du radical OH est plus importante avec l'enrichissement par l'hydrogène. L'oxydation du méthane se fait par l'intermédiaire de ce radical ce qui explique l'amélioration de la réactivité du mélange. On remarque que l'ajout d'hydrogène peut stabiliser la flamme tout en gardant un niveau quasi constant de températures, ce qui inhibe la formation des émissions nocives

Conclusion générale :

Ce travail de recherche vise à améliorer la connaissance et la compréhension des phénomènes mis en jeu lors d'un processus de combustion prémélangées. En particulier, notre but était de caractériser l'effet l'ajout de l'hydrogène sur un bruleur à swirl (LSB) avec un mélange pauvre.

L'étude bibliographique effectuée dans le premier chapitre tous les recherches pour améliores un bruleur à swirl et de l'enrichissement en hydrogène, qui permet en particulier d'étendre les limites pauvres d'inflammabilité du mélange, d'accroître la stabilité de la flamme et de minimiser le CO et CO2. Ces propriétés permettent la diminution de la richesse globale du mélange et donc une réduction des polluants tels que les NO.

Afin d'aboutir à notre but, nous avons utilisé le logiciel (ANSYS, fluent) nous avons pris le bruleur de Nogenmyr K, J, et al (2009) puis on choisit le meilleur maillage qui est le 18000 puis on fait la validation.

En conclusion cette étude était concentrée sur l'effet de l'ajout d'hydrogène sur un bruleur a swirl. La richesse globale est maintenue constante à 0.6. On a ajouté 0% jusqu'à 10% d'hydrogène. Le calcul est fait par le modèle partially premixed. On a trouvé que l'ajout de l'hydrogène augmente la vitesse de la flamme turbulente ce qui diminue la longueur de la flamme. Cette dernière se trouve en grande partie près du brûleur exposé à la turbulence qui améliore le transport de la quantité de chaleur et des radicaux. Aussi, on a noté une diminution de la concentration de CO et CO2 car le méthane est remplacé par l'hydrogène qui ne contient pas de carbone. Pour la température de la flamme, son augmentation est négligeable, elle ne dépasse pas les 1800 C° dans tous les cas d'enrichissement. En conclusion, l'enrichissement par l'hydrogène à richesse constante, celui-ci augmente la stabilité de la flamme tout en gardant les niveaux de température constants. De plus, on minimise la production du CO et du CO2 et elle augmente considérablement les émissions de NOX et pour conclure le meilleurs pourecntage est 7%.

Référence :

[1] KARIMAN MAJED, MH, EMADI, SA, NASIRI, E., *et al.* Comparaison des effets de différentes doses d'hydrogène l sur les changements thermodynamiques des patients lors de l'induction de l'anesthésie. *Journal de l'Université Māzandarān des sciences technologies,* 2006, vol. 16, n ° 54, p. 7-13.

[2] ROHANI, Behzâd et SAQR, Khalid M. Effets de l'ajout d'hydrogène sur la structure et les émissions polluantes d'une flamme tourbillonnante non confinée turbulente. *International Communications in Heat and Mass Transfer,* 2012, vol. 39, n ° 5, p. 681-688.

[3] EMADI, Majid, KARKOW, Douglas, SALAMEH, Taleb *et al.* Modifications de la structure de la flamme résultant de l'enrichissement en hydrogène et de la pressurisation pour les flammes de méthane-air pré mélangées à faible tourbillon. *Journal international de l'énergie de l'hydrogène,* 2012, vol. 37, n ° 13, p. 10397-10404.

[4]KASSEM, Hassan I., SAQR, Khalid M., ALY, Hassam S., *et al.* Implémentation du modèle de dissipation tourbillonnaire de la combustion turbulente non-pré mélangée en OpenFOAM. *International Communications in Heat and Mass Transfer,* 2011, vol. 38, n ° 3, p. 363-367.

[5] YAN, Yunfei, TANG, Weimin, ZHANG, Li *et al.* Simulation numérique de l'effet de la fraction d'addition d'hydrogène sur les caractéristiques de micro-combustion catalytique du méthane-air. *Revue internationale de l'énergie de l'hydrogène,* 2014, vol. 39, n ° 4, p. 1864-1873.

[6] COLORADO, Andrés et MCDONELL, Vincent. Émissions et performances de stabilité d'un brûleur à faible tourbillon fonctionnant avec des combustibles biogaz simulés dans un environnement de chaudière. *Génie thermique appliqué,* 2018, vol. 130, p. 1507-1519.

[7] KAUFMAN, Kelsey Leigh. Effet de l'ajout d'hydrogène et du diamètre du brûleur sur la stabilité et la structure des flammes maigres pré mélangées. 2014.

[8] HERNÁNDEZ-PÉREZ, Francisco E., GROTH, Clinton PT, et GÜLDER, Omer L. Simulation à grands tourbillons de flammes pré mélangées turbulentes hydrogène-méthane maigres dans un régime dominé par le méthane. *Journal international de l'énergie de l'hydrogène,* 2014, vol. 39, n ° 13, p. 7147-7157.

[9] KAUFMAN, Kelsey Leigh. Effet de l'ajout d'hydrogène et du diamètre du brûleur sur la stabilité et la structure des flammes maigres pré mélangées. 2014.

[10] MAMERI, Abdel Baki. *Etude numérique De la combustion turbulente du pré mélange pauvre méthane / air enrichi a l'hydrogène.* 2015. Thèse de doctorat.

[11] KASHIR, Babak, TABEJAMAAT, Sadegh, et JALALATIAN, Nafiseh. Une étude numérique sur les caractéristiques de combustion des flammes à diffusion tourbillonnaire stabilisées à corps bluffé méthane-hydrogène. *International Journal of Hydrogène Energie,* 2015, vol. 40, n ° 18, p. 6243-6258.

[12] YILMAZ, Harun, CAM, Omer, TANGOZ, Selim *et al.* Effet de différents modèles de turbulence sur les caractéristiques de combustion et d'émission des flammes d'hydrogène / air. *International Journal of Hydrogène Energie*, 2017, vol. 42, n ° 40, p. 25744-25755.

[13] PISA, Ionel, LAZAROIU, Gheorghe, et PRISECARU, Tudor. Influence de l'injection de gaz enrichi en hydrogène sur les émissions polluantes de la combustion du charbon pulvérisé. *Journal international de l'énergie de l'hydrogène,* 2014, vol. 39, n ° 31, p. 17702-17709.

[14] CARLANESCU, Razvan, PRISECARU, Tudor, PRISECARU, Malina *et al.* Injecteur à turbulence pour la combustion pré mélangée de mélanges hydrogène-méthane. *Journal of Energie Ressources Technologie*, 2018, vol. 140, n ° 7.

[15] ANGHAN, Chetan Kumar, DAVE, Sagar, SAINCHER, Shaswat *et al.* Simulation numérique directe de jets ronds transitoires et turbulents: évolution des structures tourbillonnaires et budget de turbulence. *Physique des fluides*, 2019, vol. 31, n ° 6, p. 065105.

[16] ŞENER, Ramazan, ÖZDEMIR, Mehmed R., et YANGAZ, Murat U. Influence de la géométrie du bol de piston sur les caractéristiques de combustion et d'émission. *Acts de institution of Mechanical Engineers, Partie A: Journal of Power and Energy*, 2019, vol. 233, n ° 5, p. 576-587.

[17] ABDULSADA, Mohammed H. Utilisation de mélanges d'hydrogène comme combustible dans un brûleur à remous. Dan's: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Editions IOP, 2020. p. 012154.

[18] ZHANG, Weijie, WANG, Jinhua, MAO, Runze *et al.* Étude expérimentale de flammes tourbillonnaires compactes avec des mélanges CH4 / H2 / air pré mélangés maigres dans des conditions stables et proches du soufflage. *Science expérimentale thermique et des fluides*, 2020, p. 110294.

[19] YON, Sébastien. *Oxy-combustion de l'hythane dans des brûleurs à jets fortement séparés*. 2013. Thèse de doctorat. Rouen.

[20] TTIA, Mohammed El Hadi, DRISS, Zied, et KHECHEKHOUCHE, Abderrahmane. Effet de l'Ajout de Carburant d'Hydrogène sur la Flamme de Méthane: Application pour les Paramètres Thermochimique

[21] AYOUB, Mechline. *Etude de l'extension du régime de combustion sans flamme aux mélanges Méthane/Hydrogène et aux environnements à basse température*. 2013. Thèse de doctorat.

[22] MOHAMED, CHAOUR, SOFIANE, BOULKROUNE, MOUNIRA, Bourebia, *et al.* Étude numérique de l'influence des mélanges gazeux dans un four de réchauffage. In : *Journées d'Etudes Nationales de Mécanique, JENM'2015*. 2015.

[23} Ouali Sofiane Etude et simulation numérique de la combustion turbulente des flammes prémélangées suspendues de Méthane-Air pour des bruleurs à faible nombre de swirl 2014